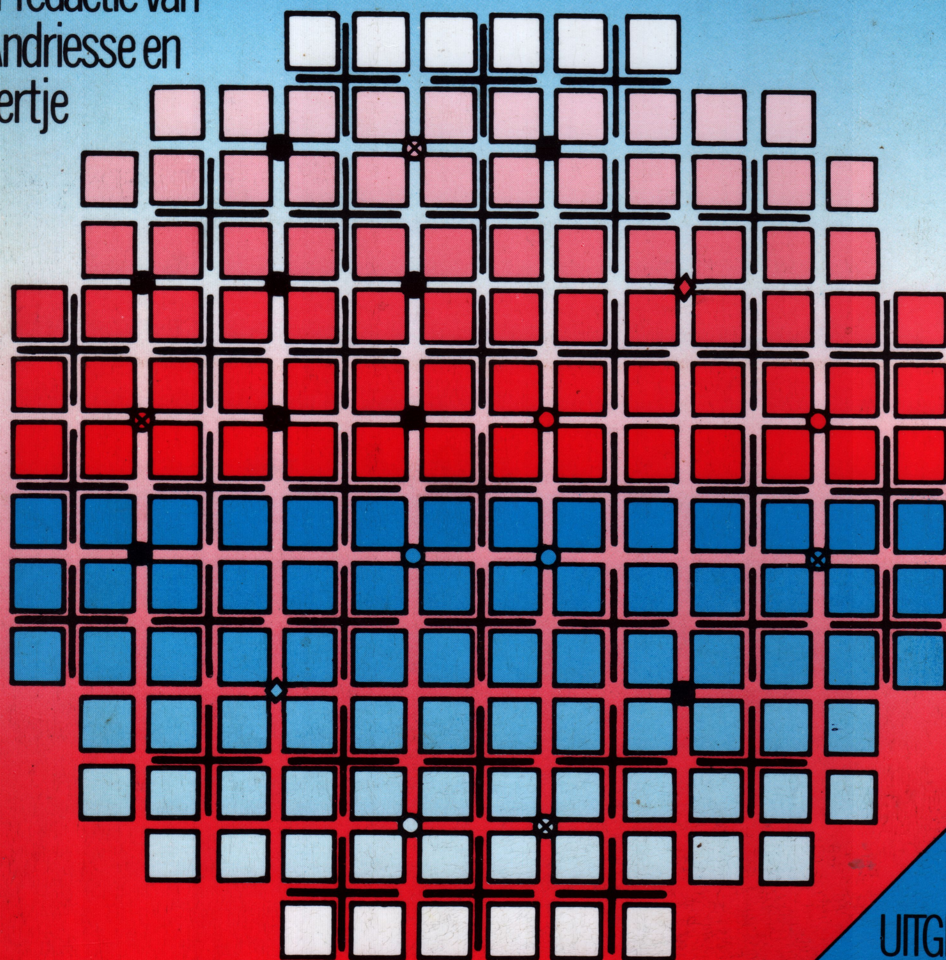
KERNENERGIE IN BEWEGING

Handboek bij vraagstukken over kernenergie

onder redactie van
C.D. Andriesse en
A. Heertje



MET UITGEBREID BEGRIPPEN REGISTER

Keesing Boeken-Amsterdam

KERNENERGIE IN BEWEGING

Handboek bij
vraagstukken over kernenergie

KERNENERGIE IN BEWEGING

Handboek bij vraagstukken over kernenergie

onder redactie van C.D. Andriesse en A. Heertje

Keesing Boeken-Amsterdam

ISBN 90 608 334 14

Uitgave: Keesing Boeken bv, Amsterdam

Vormgeving en omslagontwerp:
Uniepers bv, Amsterdam

Zetwerk: Elgraphic bv, Schiedam
Druk: Grafisch Bedrijf Assen, Assen
Binden: Schlüter & Reuter, Almere

INHOUD

VOORWOORD

Wij gebruiken ieder bijna honderd maal meer energie dan ons lichaam opbrengt. Die extra energie halen we uit de natuur. We hebben de natuur tot dienares gemaakt en zijn welvarend geworden.
Het grote energiegebruik werpt problemen op. Weliswaar zijn de energiebronnen van de natuur talrijk en verscheiden, maar hun beschikbaarheid is beperkt. Alleen als we tijdig nieuwe bronnen aanboren en ontwikkelen kunnen we een blijvend tekort voorkomen. In de naaste toekomst zal het aantal mensen op de wereld dat energie vraagt nog met enkele miljarden toenemen. Deze groei dreigt het evenwicht in de natuur te verstoren.
Eén nieuwe bron wordt geboden door de kernenergie: volstrekt eigensoortig naast de stromingsbronnen en de fossiele energiebronnen. De splijting van uraniumkernen is pas in 1938 ontdekt. Sindsdien hebben onderzoekers en ingenieurs er veel ervaring mee opgedaan. Ze zijn vertrouwd geraakt met splijtingsreacties en de radioactieve splijtingsprodukten. Verder hebben zij de mogelijkheid bestudeerd om kernsplijting toe te passen voor het opwekken van energie, met name van elektriciteit.
Regeringen meenden dat kernenergie een noodzakelijke en gelukkig tijdig beschikbare energiebron was. Was hij niet schoon, goedkoop en bijna onuitputtelijk? Reeds in de jaren vijftig werden in Engeland vier kernreactoren en in de Sovjet-Unie zes kernreactoren in bedrijf gesteld. In andere landen kwam de ontwikkeling in het begin van de jaren zestig op gang. Nederland kwam wat achteraan met de reactoren bij Dodewaard en Borssele, die respectievelijk in 1969 en 1973 elektriciteit zijn gaan leveren. Tussen 1965 en 1975 werd het aantal grote kernenergiecentrales in de wereld uitgebreid van enkele tientallen tot ruim tweehonderd. Toen stagneerde deze ontwikkeling.
Kort na 1970 kwam in de vrije wereld een protestbeweging op gang. Twijfel greep om zich heen. Is kernenergie inderdaad schoon, goedkoop en bijna onuitputtelijk? Draagt deze bron niet bij aan de verspreiding van kernwapens? Wat te doen met de radioactieve splijtingsprodukten? Zijn de centrales afdoende beveiligd tegen storingen? Het ongeluk met de centrale bij Harrisburg in de Verenigde Staten, dat weliswaar geen slachtoffers vergde maar wel ernstig en kostbaar was, heeft deze kritische vragen een aanzienlijk gewicht gegeven. De in brede kring duidelijk geworden mogelijkheden en gevaren van deze technologie zijn het onderwerp van een politieke discussie. Kernenergie is in de waagschaal gesteld.

Wat is kernenergie ons eigenlijk waard? De discussie gaat vooral over waarden en nauwelijks over feiten. Maar waarden staan niet los van feiten. Daarom is een politieke afweging van de bruikbaarheid van kernenergie onmogelijk zonder in te gaan op de feiten. Het is de – misschien verwaarloosde – plicht van onderzoekers om de feiten van kernenergie, waarover men het eens is, aan een breed publiek bekend te maken.
Dit boek is een poging daartoe. Ook al is het niet het eerste over dit onderwerp, het is wel het eerste in zijn opzet. Om een zo betrouwbaar mogelijke bron van feiten te zijn is het geschreven door een groot aantal vakmensen, die elk op het gebied van hun deskundigheid een hoofdstuk hebben verzorgd. De nadruk ligt op de Nederlandse situatie. Waarde-oordelen zijn zoveel mogelijk achterwege gelaten en het hele terrein van de kernenergieproblematiek wordt bestreken. Deze opzet heeft het voordeel dat onderwerpen, die vanwege hun belang door verschillende auteurs worden behandeld, goed uit de verf komen. De toegankelijkheid wordt bovendien bevorderd doordat een uitgebreid register is opgenomen.

De schrijvers hopen dat dit boek in een behoefte aan gedegen feitelijke informatie zal voorzien. Die behoefte bestaat waar een nuchtere en zakelijke afweging plaatsvindt om tot een politiek oordeel te komen. Zij doet zich ook gevoelen in het geval dat Nederland verder zal afzien van de bouw van kerncentrales, omdat de landen om ons heen intussen veel van die centrales hebben gebouwd. Wellicht plaatst die ontwikkeling de brede maatschappelijke discussie in een ander licht.

De redacteuren
Doorwerth/Naarden, maart 1982

I TECHNIEK

1. ATOMEN EN ATOOMKERNEN

P.J. Brussaard

In atoomkernen is veel energie opgeslagen. Een juist begrip van deze kernenergie is niet mogelijk zonder kennis van de voornaamste eigenschappen van atomen en hun kernen. Atomen zijn de bouwsteentjes van de gewone chemische stoffen. Toch zijn ze niet, zoals hun naam suggereert, ondeelbaar. Ze bestaan uit een zware kern met een ijle omhulling van elektronen, terwijl die kern weer is samengesteld uit twee soorten kerndeeltjes of nucleonen. Deze twee soorten zijn de protonen en de neutronen. De nucleonen trekken elkaar krachtig aan, zodat de kern een hecht gebonden eenheid vormt. De protonen onder hen stoten elkaar echter ook af omdat ze een positieve lading dragen en ondermijnen zo de kernbinding. Bevat de kern veel nucleonen, dan blijkt de afstotende kracht tussen de protonen de aantrekkende kracht van de nucleonen onderling te kunnen evenaren. Een kleine verstoring van zo'n kern met veel nucleonen, bijvoorbeeld door het toevoegen van een neutron, kan tot de splijting in twee brokstukken en een paar losse neutronen leiden. Bij deze splijting komt een deel van de bindingsenergie van de kern vrij, namelijk het deel dat overeenkomt met het verschil in massa tussen de kern enerzijds en de brokstukken en de losse neutronen anderzijds. Dit is heel veel meer dan bij de verbranding van chemische stoffen pleegt vrij te komen.

De materie waarmee we dagelijks hebben te maken is opgebouwd uit atomen. Deze atomen kunnen in verschillende aantallen en op verschillende wijzen met elkaar worden gecombineerd tot verschillende moleculen. Zo bestaat de zuurstof in de lucht uit moleculen O_2, een combinatie van twee zuurstofatomen. Waterdamp bestaat uit moleculen H_2O, die zijn samengesteld uit twee waterstofatomen en een zuurstofatoom. Ook de herschikking van atomen in een molecule kan tot een geheel ander molecule, en dus tot een andere verschijningsvorm van materie, leiden.

Om te begrijpen hoe enkele atomen een molecule kunnen vormen, is het nodig te weten hoe een atoom is opgebouwd. Het atoom bestaat uit een elektrisch positief geladen atoomkern waarin vrijwel alle massa is geconcentreerd en een aantal negatief geladen elektronen die op enige afstand om deze kern cirkelen. De afmetingen van de kern zijn van de orde van 10^{-15} meter (=0,00.....001 meter, met veertien nullen achter de komma) en de cirkelbanen van de elektronen hebben een diameter van de orde van 10^{-10} meter, vele malen groter dan de kern dus.

De chemische binding van atomen tot moleculen vindt zijn oorzaak in de elektrische krachten tussen de atoomkernen en de elektronen. Wanneer bijvoorbeeld koolstof wordt verbrand verbinden zich een koolstofatoom C en een zuurstofmolecule O_2 die zich eerst op grote afstand van elkaar bevinden, tot een kooldioxydemolecule CO_2 waarin de atomen, die elkaar aantrekken, zich op kleine afstand van elkaar bevinden. Bij dit proces wordt potentiële energie omgezet in kinetische energie, dat wil zeggen bewegingsenergie van het CO_2-molecule, en de laatste vorm van energie wordt waargenomen als de verbrandingswarmte. Warmte kan men namelijk beschouwen als de bewegingsenergie van de materiedeeltjes op microscopische schaal.

De energieomzetting kan worden geïllustreerd met een analogie uit de zwaartekracht. Indien we een steen vastbinden aan een touw dat over een vaste katrol

hangt, kunnen we, wanneer de steen valt en het andere eind van het touw wordt omhooggetrokken, het touw arbeid laten verrichten, bijvoorbeeld door het om de as van een dynamo te wikkelen. De as zal gaan draaien bij het vallen van de steen. Hier wordt, doordat de steen toegeeft aan de aantrekkingskracht van de aarde, potentiële energie omgezet in bewegingsenergie van de dynamo, die weer wordt omgezet in elektrische energie. Op dergelijke wijze is ook het vrijkomen van grote hoeveelheden warmte bij kernfysische fusie- en splijtingsprocessen te begrijpen.

Een atoomkern blijkt te zijn opgebouwd uit twee soorten deeltjes, namelijk de elektrisch positief geladen protonen en de elektrisch neutrale neutronen. Deze twee soorten deeltjes bezitten vrijwel dezelfde massa en worden samengevat onder de naam nucleonen. De nucleonen trekken elkaar op korte afstand zeer sterk aan. Deze aantrekkingskracht, die de kernkracht wordt genoemd, is ongeveer een miljoen maal sterker dan de elektrische kracht die de chemische binding veroorzaakt. Dit heeft ten gevolge dat bij kernfysische processen (dat wil zeggen herschikking van nucleonen) van veel grotere energieën sprake is dan bij chemische processen.

In de natuur komen tweeënnegentig elementen voor die zich onderscheiden door verschillende chemische eigenschappen. Elk element wordt gekenmerkt door het aantal protonen in de kern. Dit aantal, aangeduid met Z, is gelijk aan het aantal elektronen die in het normale atoom om de kern cirkelen, zodat het atoom als geheel elektrisch neutraal is. Deze elektronen bepalen de chemische eigenschappen.

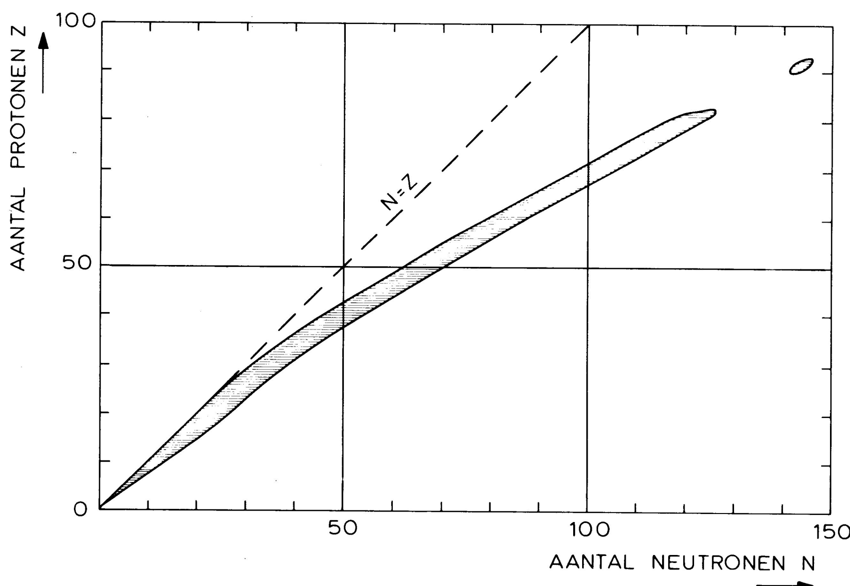
Zo bestaat het waterstofatoom uit een proton ($Z = 1$) als kern waaromheen een elektron cirkelt. Twee protonen kunnen samen geen kern vormen, maar twee protonen en twee neutronen vormen samen een zeer stabiele kern, en wel die van het heliumatoom. Dit gedrag is een gevolg van bepaalde eigenschappen van de kernkrachten waarvan de bespreking ver buiten het kader van deze verhandeling valt.

Het aantal neutronen in een kern wordt aangeduid met N. Het totale aantal nucleonen in een kern wordt het massagetal $A = Z + N$ genoemd. Met elke Z-waarde (atoomnummer) van 1 tot 92 correspondeert een in de natuur voorkomend element. Het blijkt dat bij elke Z niet slechts één waarde van N behoort. Zo is er naast het gewone waterstof $Z = 1$, $N = 0$ ook het zware waterstof of deuterium $Z = 1$, $N = 1$ waarvan het atoom eveneens één elektron bevat omdat nog altijd de atoomkern één positieve lading heeft. Het extra neutron in de kern verandert dus niet de chemische eigenschappen. Dergelijke elementen die uitsluitend verschillen in neutronenaantal N noemt men isotopen. Chemisch zijn ze praktisch identiek. In het watermolecule H_2O kunnen de waterstofatomen worden vervangen door deuterium. Het resultaat is zwaar water, D_2O.

Kernen die hetzelfde massagetal A bezitten noemt men isobaren. Zij verschillen wel in Z-waarde (en in N-waarde) en behoren dus bij verschillende chemische elementen.

Men kan de in de natuur voorkomende, stabiele elementen elk een plaats geven in een diagram waar Z en N langs de assen zijn uitgezet. Uit figuur 1 blijkt dat de verhouding $\frac{Z}{A} = \frac{Z}{Z+N}$ afneemt, naarmate de kernen zwaarder worden. De zwaardere kernen zijn dus, ook verhoudingsgewijs, rijker aan neutronen dan de lichtere kernen.

Aangezien, zoals reeds eerder is opgemerkt, bij kernfysische processen van zeer grote energieën en energieverschillen sprake is, zal nu eerst enige aandacht moeten worden geschonken aan de massa-energierelatie. Onderzoek heeft aangetoond dat met een bepaalde hoeveelheid energie, hoe ongrijpbaar en niet-materieel dit begrip ook moge schijnen, een bepaalde hoeveelheid massa correspondeert. Het precieze verband wordt gegeven door de massa-energierelatie van Einstein: $E = Mc^2$ of $M = E/c^2$. Hier is E de energie (in joules), M de massa (in kilogrammen) en c ($= 3 \times 10^8$ meter per seconde) de lichtsnelheid in vacuüm. Zo correspondeert de



Figuur 1
Het gebied van de stabiele kernen die in de natuur voorkomen, is gearceerd weergegeven. Kernen die evenveel neutronen als protonen bevatten, zouden op de lijn $N = Z$ moeten liggen.

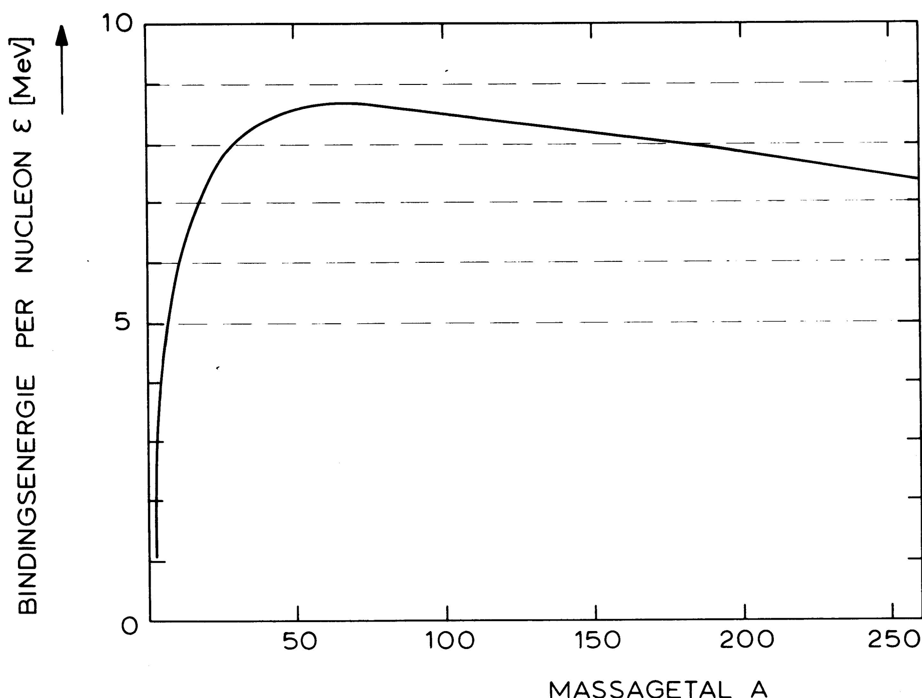
---

massa van 1 kg met 90 PJ. De misschien meer vertrouwde hoeveelheid energie van 1 kilowattuur correspondeert met een massa van 4×10^{-11} g.

Wanneer we de massa van een in de natuur voorkomend atoom (dat wil zeggen kern plus elektronen) vergelijken met de som van de massa's van de samenstellende protonen, neutronen en elektronen, blijkt de massa van het complete atoom kleiner te zijn dan de sommassa van de delen. Dit verschil in massa correspondeert met de vormingsenergie of bindingsenergie van het atoom, en is dus te vergelijken met verbrandingswarmte in de chemie. Het massaverschil kan direct in formulevorm worden gegeven als:

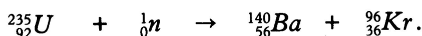
$$\frac{\Delta E}{c^2} = Z M_H + N M_n - M_A$$

waar M_A de massa van het complete atoom (Z protonen, N neutronen, Z elektronen) is, M_H de massa van het waterstofatoom (1 proton, 1 elektron) en M_n de massa van het neutron. Delen we het massaverschil nog door het totale aantal nucleonen A ($= Z + N$) dan volgt een maat voor de 'energiewinst' die per nucleon kan worden gemaakt bij de vorming van een bepaald atoom. Onderlinge vergelijking van deze mogelijke 'energiewinsten' vertelt ons of het misschien voordelig is om een atoomkern samen te stellen uit andere of te splijten in andere. De optredende massa*verschillen* hebben we leren kennen als kernenergie. Het is dus niet zo dat voor het verkrijgen van kernenergie een atoomkern geheel moet verdwijnen, maar het is het verschil in bindingsenergie van verschillende configuraties van de bestanddelen (de nucleonen) in atoomkernen dat wordt waargenomen als kernenergie. Ook bij een chemische reactie waarbij warmte vrijkomt of wordt opgenomen is er een massaverschil tussen begin- en eindtoestand, maar doordat daarbij van veel geringere energieën sprake is, zijn de massaverschillen niet meetbaar.



Figuur 2
De bindingsenergie per nucleon, $\epsilon = (ZM_H + NM_n - M_A)\,c^2/A$, blijkt een vlak maximum te vertonen voor het massagebied $A \cong 60$. In deze figuur is alleen de gemiddelde bindingsenergie bij een bepaald massagetal weergegeven; in werkelijkheid bestaat een zekere spreiding rondom die gemiddelde waarde door een spreiding in de bindingsenergie van de proton-neutroncombinaties die bij dit massagetal mogelijk zijn.

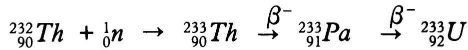
Het energieverschil per nucleon, $\epsilon = \Delta E/A$, is uitgezet tegen het massagetal A in figuur 2. Uit deze figuur blijkt dat kernenergie is te winnen zowel door lichte kernen (waterstof, helium, lithium) te doen samensmelten tot zwaardere kernen als ook door zware kernen (uranium) te splijten in lichtere kernen. Het eerste proces wordt fusie genoemd, het tweede splijting of ook wel fissie.
Men kan zich nu afvragen hoe zware kernen kunnen bestaan indien het energetisch zo veel voordeliger is in lichtere kernen uiteen te vallen. De reden moet worden gezocht in het feit dat een bepaalde energiedrempel moet worden overwonnen voordat het splijtingsproces op gang kan komen. Het is om dezelfde reden dat niet alle hout en steenkool spontaan verbranden.
Voor sommige zware kernen kan men het splijtingsproces op gang brengen door de kern met een neutron te beschieten. Dit neutron wordt geabsorbeerd, zijn bindingsenergie van ongeveer 7 MeV (zie figuur 2) komt vrij en dat kan dan de kern in zodanige beroering brengen dat splijting volgt. Dit proces kan men zich voorstellen als het opbreken van een vloeistofdruppel. Het massaverschil tussen de beginkern en de gezamenlijke brokstukken manifesteert zich als bewegingsenergie en dus uiteindelijk als warmte.
Het eerste kunstmatige splijtingsproces werd in 1938 waargenomen door O. Hahn en F. Strassmann, toen uranium-235 na bestraling met neutronen uiteenviel in barium-140 en krypton-96 volgens de kernreactie:


$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{56}Ba + ^{96}_{36}Kr.$$

Bij dit proces ontstaan twee nucliden als brokstukken.
Het is voor een kernreactor echter van wezenlijk belang dat bij het splijtingsproces ook afzonderlijke neutronen vrijkomen die op hun beurt weer een splijtingsproces op gang kunnen brengen. Zo kan, mits bij elke splijting voldoende neutronen vrijkomen, het splijtingsproces zichzelf aan de gang houden. Men heeft dan te maken met een kettingreactie. De meeste neutronen ontstaan direct na de splijtingsreactie; deze neutronen worden de prompte neutronen genoemd. De splijtingsprodukten kunnen echter ook nog neutronen uitzenden. Deze vertraagde neutronen dragen eveneens bij aan het handhaven van de kettingreactie.
Niet alle neutronen worden echter even gemakkelijk door atoomkernen gevangen. De kans dat een neutron door een kern wordt geabsorbeerd, wordt gegeven door een grootheid die men de werkzame doorsnede noemt. Het blijkt dat deze werkzame doorsnede afneemt met toenemende snelheid van de neutronen, zodat het voor een kettingreactie wenselijk is de snelle neutronen die bij splijting vrijkomen, af te remmen tot lage snelheid. Dit afremmen geschiedt door botsingen tegen de kernen van een moderator. Als moderator of remstof wordt gewoon water, zwaar water of grafiet (koolstof) gebruikt. Wanneer de neutronen tot een snelheid die overeenkomt met kamertemperatuur zijn afgeremd, worden zij thermisch genoemd. Thermische neutronen kunnen gemakkelijk door de splijtstof worden geabsorbeerd.
Slechts twee natuurlijke nucliden, namelijk ${}^{233}_{92}U$ en ${}^{235}_{92}U$, vertonen kernsplijting na absorptie van een thermisch neutron.* Voor andere natuurlijke nucliden, zoals ${}^{232}_{90}Th$, ${}^{234}_{92}U$, ${}^{236}_{92}U$ en ${}^{238}_{92}U$, moet het geabsorbeerde neutron nog enige extra kinetische energie bezitten (van de orde van grootte van 1 MeV) om het splijtingsproces op gang te kunnen brengen. Met deze nucliden kan geen kettingreactie worden gehandhaafd. Van de kunstmatige nucliden kunnen ${}^{239}_{94}Pu$ en ${}^{241}_{94}Pu$ door thermische neutronen tot splijting worden gebracht.
Er gaan natuurlijk ook neutronen verloren doordat zij het splijtingsmateriaal verlaten via het buitenoppervlak. Deze verliezen zijn evenredig met het buitenoppervlak, dat wil zeggen evenredig met het kwadraat van de lineaire afmetingen van de hoeveelheid splijtstof. De produktie van neutronen is echter evenredig met het volume van de hoeveelheid splijtstof, dat wil zeggen met de derde macht van de lineaire afmetingen. Dit betekent dat met toenemende hoeveelheid splijtstof de produktie van neutronen het zal gaan winnen van de verliezen. Bij een bepaalde hoeveelheid, de kritieke massa, zal dan een kettingreactie mogelijk zijn. Na verloop van tijd zal zoveel materiaal zijn verspleten tot lichtere brokstukken dat de kettingreactie eindigt.
De grootte van de kritieke massa hangt af van een aantal uiteenlopende omstandigheden, zoals bijvoorbeeld de geometrie van het systeem, de aanwezigheid van neutronenabsorberend materiaal en de concentratie van de te versplijten nucliden.
Het is nu ook duidelijk dat de neutronenbalans des te gunstiger zal zijn naarmate de concentratie van splijtmateriaal zoals ${}^{235}_{92}U$ groter is. Om een kettingreactie te kunnen handhaven is het nodig natuurlijk uranium (voornamelijk ${}^{238}_{92}U$ waarin zich slechts 0,71% van het isotoop ${}^{235}_{92}U$ bevindt) te verrijken. Dit houdt in dat men door middel van fysische methoden (bijvoorbeeld diffusieprocessen) de concentratie van ${}^{235}_{92}U$ vergroot.
Wanneer echter de neutronen niet tot thermische snelheid worden afgeremd heeft men, zoals eerder is uiteengezet, het nadeel van een veel kleinere werkzame doorsnede voor het neutronabsorptieproces, maar men kan met voordeel gebruik maken van het feit dat de er op volgende splijtingsreactie enigszins anders verloopt. Er kunnen dan namelijk bij elke reactie meer dan twee neutronen worden

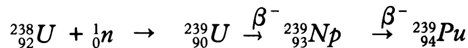
* Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368

geproduceerd, waarvan er één nodig is voor de voortzetting van de kettingreactie, één kan worden gebruikt voor het kweekproces en de rest verloren gaat door niet-produktieve absorptieprocessen en verliezen door de buitenwand.
In het kweekproces worden ${}^{232}_{90}Th$ en ${}^{238}_{92}U$, die beide door thermische neutronen niet tot splijting kunnen worden gebracht, omgezet in ${}^{233}_{92}U$ en respectievelijk ${}^{239}_{94}Pu$, die beide wel door absorptie van thermische neutronen tot splijting kunnen overgaan. De reacties die hierbij een rol spelen, verlopen als volgt:



$${}^{232}_{90}Th + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{233}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{91}Pa \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{92}U$$

en



$${}^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{90}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu$$

In beide gevallen ontstaat na absorptie van een neutron een isotoop dat tweemaal achtereenvolgens door β^--verval (emissie van een elektron) in een andere kern verandert. Aangezien de gekweekte eindkernen een lange levensduur hebben, zullen zij zich ophopen in een reactor, maar niet boven een zekere hoeveelheid, omdat splijtingsprocessen en andere kernreacties dit tegenwerken.
Het is vooral de uranium-plutoniumcyclus die tot nu toe is gebruikt. De extra neutronen kunnen dus worden gebruikt om het niet-splijtbare uranium om te zetten in het splijtbare plutonium. Zo kan men zelfs met meer plutonium – 239 eindigen dan men met uranium – 235 is begonnen. Omdat bij deze reactoren de neutronen niet worden afgeremd tot thermische snelheid, spreekt men van snelle reactoren.
Er dient hier volledigheidshalve te worden opgemerkt dat het kweekproces in principe ook met thermische neutronen mogelijk is, en wel met de thorium-uraniumcyclus. De opbrengst is echter geringer dan voor de snelle reactor met de uranium-plutoniumcyclus. Dit houdt verband met het eerder genoemde feit dat thermische neutronen gemakkelijker kunnen worden weggevangen dan snelle neutronen.
Uit figuur 1 is duidelijk dat de brokstukken die bij splijting ontstaan relatief meer neutronen bevatten dan de stabiele kernen in dat massagebied, ondanks het feit dat na de kernreactie onmiddellijk ook neutronen vrijkomen. Deze brokstukken zijn niet stabiel en zullen vervallen tot stabiele kernen. Dit verval geschiedt door emissie van neutronen (die weer kunnen bijdragen aan de kettingreactie), alfadeeltjes (heliumkernen), bètadeeltjes (elektronen) of gammastraling (elektromagnetische straling). De reactieprodukten zijn dus radioactief. Er wordt bij deze vervalprocessen ook warmte geproduceerd, maar doordat het voornamelijk andere krachten betreft dan de sterke kernkrachten is dit in veel mindere mate het geval dan bij de splijtingsreacties. Het betreft ongeveer 7% van de totale warmteproduktie.
Nadat een reactor is stilgelegd zal dus warmte blijven worden voortgebracht door de vervalprodukten, maar deze produktie van warmte (en neutronen) zal afnemen met de tijd. Radioactief verval kan men namelijk kenmerken door een halveringstijd. Dat is de tijd waarin de helft van het oorspronkelijke aantal kernen is vervallen tot andere kernen. Na bijvoorbeeld drie of tien halveringstijden is nog $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$ of respectievelijk $(1/2)^{10} = 1/1024$ deel over van het beginmateriaal. Halveringstijden lopen uiteen van onderdelen van een seconde tot vele duizenden jaren. De energie en de aard van de uitgezonden deeltjes of straling zijn echter een belangrijke factor voor de beoordeling van de mogelijke schadelijkheid.
Tot nu toe is hier alleen aandacht geschonken aan splijtingsreacties; die heeft men kunnen toepassen in kernreactoren.
Om een fusiereactie te laten plaatsvinden dienen de samen te smelten atoomkernen elkaar met zo hoge snelheid te naderen dat de wederzijdse afstoting ten gevolge van de positieve elektrische lading kan worden overwonnen. Zoals reeds eerder werd

vermeld zijn bij hoge temperaturen atomen in heftige beweging: hun gemiddelde snelheid is hoog. Bij thermonucleaire reacties probeert men deze hoge snelheden van de warmtebeweging te gebruiken om fusiereacties mogelijk te maken. De bindingsenergie die vrijkomt bij een fusiereactie resulteert in vergrote warmtebeweging, die ten dele moet worden gebruikt om warmteverliezen te compenseren en ten andere dele de nuttige energieopbrengst van de fusiereactor representeert.
Bij de hoge temperatuur die is vereist voor thermonucleaire reacties (ca. 100.000.000 °C), is het gas in de reactor vrijwel geheel geïoniseerd; de atomen zijn ten gevolge van botsingen hun elektronen kwijt geraakt en men heeft een mengsel van atoomkernen (de positief geladen ionen) en elektronen (negatief geladen). Een dergelijk volledig geïoniseerd gas wordt een plasma genoemd. Het grote probleem hier is nu het hete plasma van voldoende dichtheid voldoende lange tijd op te sluiten. Dit kan niet gebeuren door materiële wanden, omdat dan te snelle afkoeling zou optreden. Men zoekt naar methoden om het plasma, dat een zeer goede elektrische geleider is, op te sluiten met behulp van magnetische velden. De energieproduktie per volume moet voldoende groot zijn om de stralingsverliezen te overwinnen en zo de temperatuur voldoende hoog te houden.
De te benutten fusiereacties (zie hoofdstuk 10) leiden niet tot radioactieve kernen zoals de splijtingsreacties, waarbij de brokstukken een neutronenoverschot vertonen.

2. KERNSPLIJTINGS-REACTOREN

H. van Dam

Splijtingsreacties tussen zware atoomkernen zijn op gang te houden door steeds een neutron, afkomstig van een gespleten kern, op een geschikte manier toe te voegen aan een volgende kern. Er ontstaat dan een kettingreactie van splijtingen. Voor dit doel dienen kernreactoren. In de praktijk wordt meestal gewerkt met de atoomkern van de uranium-isotoop 235. De reactor moet zodanig ingericht worden dat de bij splijting geproduceerde neutronen worden afgeremd tot ze voldoende langzaam bewegen om met grote kans door een volgende kern te worden gevangen. Daarvoor is een remstof of moderator nodig. Afhankelijk van de keuze van de remstof ontstaan verschillende typen reactoren. De thans meest gangbare reactor gebruikt daar gewoon water voor, dat tevens dient om de warmte af te voeren die door de splijtingen in de splijtstof ontstaat. Zo kan men stoom opwekken, waarvan de energie met behulp van een turbogenerator wordt omgezet in elektriciteit. Bij een zuinig gebruik van de splijtstof worden tevens de splijtingsneutronen benut die voor het op gang houden van de kettingreactie niet nodig zijn. Met deze neutronen kunnen splijtbare atoomkernen worden gekweekt uit andere, zelf niet splijtbare atoomkernen.

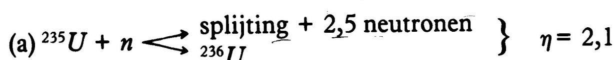
Historische inleiding

In 1932 werd door Chadwick een nieuw elementair deeltje ontdekt, dat geen elektrische lading bleek te hebben en daarom 'neutron' werd genoemd. Deze ontdekking bleek in twee opzichten heel belangrijk: de fysici kregen een beter beeld van de bouw van atoomkernen en konden met neutronen veel gemakkelijker kernreacties veroorzaken dan voorheen, aangezien het nieuwe deeltje dankzij zijn elektrische neutraliteit niet door de positief geladen atoomkernen werd afgestoten, wat bij protonen en alfadeeltjes wel het geval was. In de daaropvolgende jaren gingen de fysici dan ook atoomkernen van allerlei soort met neutronen beschieten. De Italiaan Fermi deed dat in 1934 met uranium, maar door een verkeerde interpretatie van zijn experimenten (die hem desalniettemin in 1938 de Nobelprijs bezorgden) miste hij de kans om de ontdekker van kernsplijting te worden. In 1935 werd de isotoop uranium-235 (^{235}U) ontdekt; deze isotoop bleek voor slechts 0,7% in natuurlijk uranium voor te komen, de rest bestaat uit uranium-238 (^{238}U). Drie jaren later wisten Hahn en Strassmann het optreden van kernsplijting na beschieting van uranium met neutronen aan te tonen en een jaar later werd bewezen dat bij de kernsplijting, waarbij een grote hoeveelheid energie vrijkomt omdat de positief geladen brokstukken elkaar afstoten, een aantal neutronen vrijkomt. Dit laatste deed de fysici koortsachtig verder zoeken, omdat daardoor het perspectief was geopend van een zichzelf onderhoudende kettingreactie van kernsplijtingen.
In 1940 werd aangetoond dat alleen het ^{235}U goed splijtbaar is, hetgeen een teleurstelling was aangezien dat maar in zo'n lage concentratie in natuurlijk uranium voorkomt. De fysici vroegen zich af of het wellicht noodzakelijk zou zijn het uranium te 'verrijken' in de isotoop ^{235}U om de splijtoven te laten werken, hetgeen geen eenvoudige zaak zou zijn. In 1942 echter slaagde Fermi (inmiddels naar de Verenigde Staten uitgeweken) erin met natuurlijk uranium de eerste kernreactor in werking te krijgen. Dit werd echter aan zeer weinigen bekend omdat het onderzoek als gevolg van de oorlog geheim was verklaard. Het duurde tot 1951 voordat de eerste elektri-

citeit uit kernenergie werd verkregen. Begin 1979 waren er op de wereld 230 kerncentrales, met een totaal vermogen van 116.000 MW(e) in bedrijf. Er waren 370 kerncentrales met een totaal vermogen van 365.000 MW(e) besteld of in aanbouw en de nucleaire elektriciteitsproduktie bedroeg 6% van de totale wereldelektriciteitsproduktie. Voorts zijn er op de wereld ca. 300 onderzoekreactoren, waarmee geen elektriciteit wordt opgewekt, maar die dienen voor onderzoek van de reactor zelf of de straling leveren voor onderzoek op andere gebieden van wetenschap.

Principes

Voor de werking van kernreactoren zijn vooral de volgende kernreacties van belang:





Bij (a) wordt aangeduid dat bij opname van een neutron in een ^{235}U-kern twee resultaten mogelijk zijn: de kern splijt waarbij enkele neutronen worden uitgezonden óf er wordt ^{236}U gevormd, dat niet splijtbaar is. In het laatste geval is er uiteraard geen neutronenproduktie. De gemiddelde neutronenproduktie per neutronenabsorptie noemt men de neutronenopbrengstfactor η (èta).
Na de kernsplijting zijn twee kernen ontstaan die elkaar elektrisch sterk afstoten. Hierdoor vliegen zij met zeer grote snelheid uit elkaar (ca. 10.000 km/sec.). Door botsingen met andere atomen staan zij hun energie af; de hevige beweging van alle atoomkernen die daarbij betrokken zijn openbaart zich als warmte, die bijvoorbeeld op 'klassieke' manier in elektriciteit kan worden omgezet.
Bij opname van een neutron in een ^{238}U-kern treedt geen splijting op, maar wordt ^{239}U gevormd dat na spontaan bètaverval in ^{239}Np (neptunium) en vervolgens in het goed splijtbare ^{239}Pu (plutonium) overgaat.
Bovenstaande reacties zijn beide van groot belang: reactie (a) zorgt voor energieproduktie èn neutronenproduktie en is dus essentieel voor de totstandkoming van een kettingreactie, reactie (b) zet niet-splijtbaar materiaal om in goed splijtbaar plutonium. De laatste reactie maakt dus alle uraniumkernen tot potentiële splijtstof, mits men natuurlijk over voldoende neutronen beschikt.
Het principe van een kettingreactie is heel eenvoudig: wanneer men zorgt dat van de neutronen die bij reactie (a) worden geproduceerd er één weer in ^{235}U wordt geabsorbeerd, zullen de reacties (a) steeds doorgaan: er wordt op constant niveau energie geproduceerd. In natuurlijk uranium komt echter, zoals we eerder zagen, 140 maal zoveel ^{238}U voor als ^{235}U, zodat de neutronenverslindende reacties (b) overheersen en een kettingreactie niet in stand kan worden gehouden zonder speciale maatregelen. Welke maatregelen zijn dat?
Eén mogelijkheid ligt voor de hand: wanneer we de verhouding tussen de uraniumisotopen in het voordeel van ^{235}U wijzigen, dus de splijtstof gaan *verrijken*, dan zullen de reacties (b) minder kans krijgen en blijven voldoende neutronen over om de kettingreacties voort te zetten. Er is echter een elegantere oplossing: wanneer we de bij splijting vrijkomende snelle neutronen (snelheid ca. 20.000 km/sec.) afremmen tot een snelheid van ca. 2 km per seconde, dan worden niet alleen zoals verwacht de neutronen veel sneller weer geabsorbeerd, maar bovendien blijkt reactie (a) ten opzichte van reactie (b) veel betere kansen te krijgen; de neutronen worden meer selectief door het ^{235}U geabsorbeerd. Dat afremmen van de neutronen gebeurt op heel eenvoudige wijze, namelijk door botsingen met lichte atoomkernen. Men moet dan natuurlijk wel zorgen dat de *neutronenremstof* of *moderator*

nauwelijks of liefst geen neutronen absorbeert, want dat verstoort de voortgang van de kettingreactie. Fermi gebruikte in de eerste reactor zeer zuiver grafiet als moderator, dat zo'n goede remstof bleek te zijn dat de reactor op natuurlijk uranium kon werken. Hetzelfde blijkt mogelijk met zwaar water als moderator. Gewoon water ('licht' water) kan ook als remstof dienen, maar het absorbeert meer neutronen dan grafiet of zwaar water, zodat het uranium moet worden verrijkt tot 2% à 3% ^{235}U.

Neutronen die zijn afgeremd tot een snelheid van ongeveer 2 km per seconde worden 'thermische' neutronen genoemd omdat hun restenergie geheel wordt bepaald door de warmtetrillingen van de atomen in de remstof. Reactoren waarin van het afremprincipe gebruik wordt gemaakt noemt men dan ook 'thermische' reactoren, hetgeen dus niets heeft te maken met de warmteproduktie door splijtingen. Zij worden verder onderscheiden naar het type moderator: lichtwaterreactoren, zwaarwaterreactoren, grafietreactoren.

Reactortypen

Tabel I geeft een overzicht van de toegepaste reactortypen in kerncentrales. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de lichtwaterreactoren de grote 'winnaars' zijn, in het bijzonder de drukwaterreactor. Naar de huidige stand van zaken verliezen de grafietreactoren snel terrein, terwijl de zwaarwaterreactoren langzaam terrein moeten prijsgeven. De snelle kweekreactor, waarin geen neutronenremstof wordt gebruikt, wordt verderop nog nader bekeken.

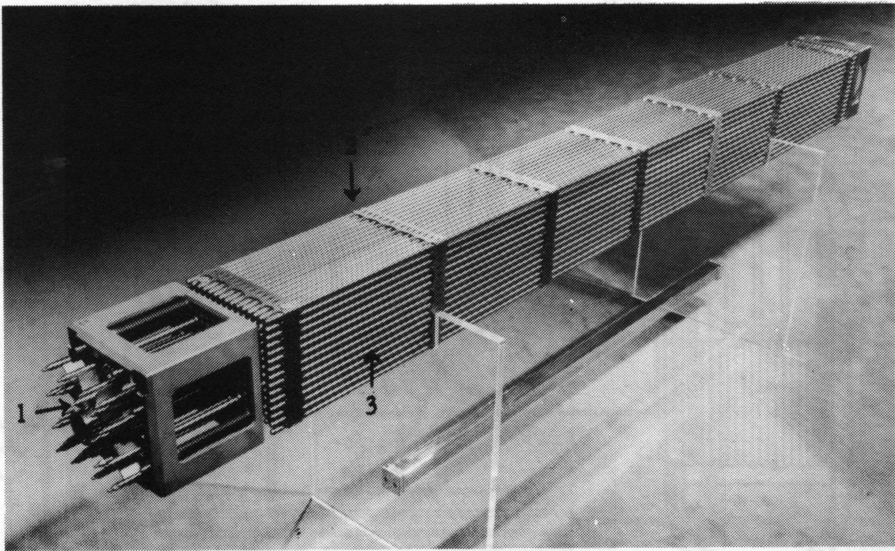
Tabel I. Toegepaste reactortypen in kerncentrales.

LWR = lichtwaterreactor
PWR = drukwaterreactor (Pressurized Water Reactor)
BWR = kokendwaterreactor (Boiling Water Reactor)
HWR = zwaarwaterreactor (Heavy Water Reactor)
FBR = snelle kweekreactor (Fast Breeder Reactor).

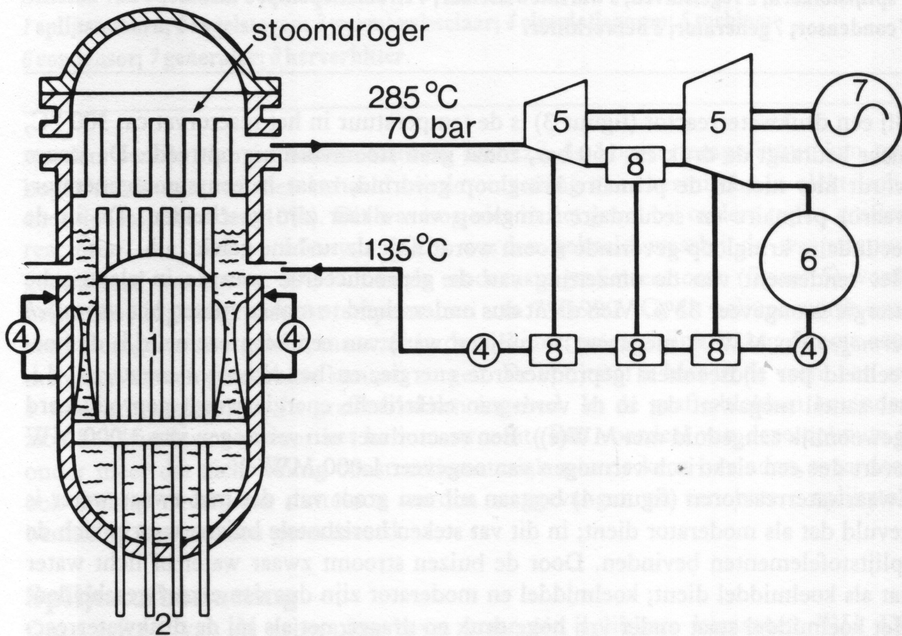
1979

type:		in bedrijf (%):	in aanbouw/besteld (%):
LWR	PWR	38	65
	BWR	25	21
Grafietreactor		27	5
HWR		8	7
FBR		2	2

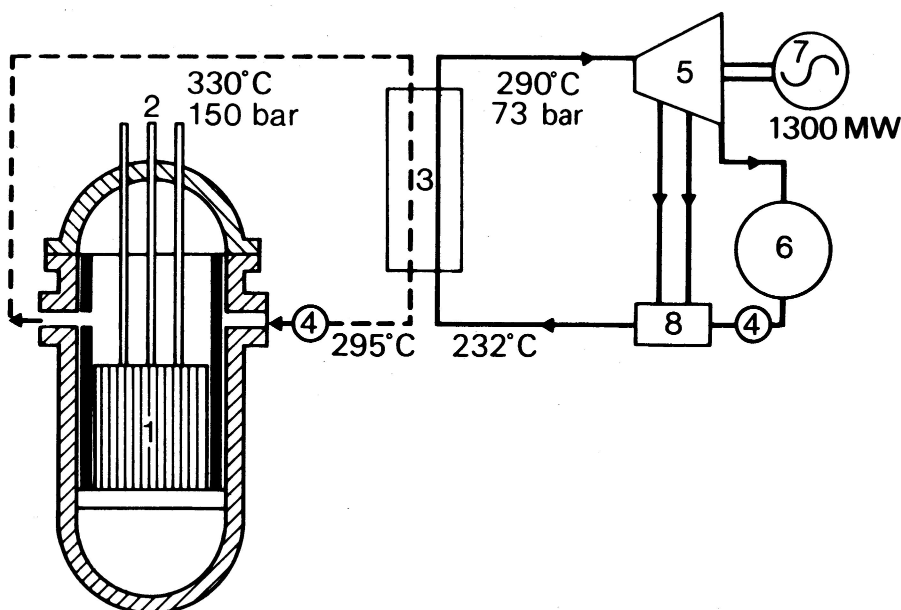
Men onderscheidt twee typen lichtwaterreactoren, namelijk de *kokendwaterreactor* (in ons land in de kerncentrale Dodewaard) en de *drukwaterreactor* (in ons land in de kerncentrale Borssele). In beide reactortypen bestaat de splijtstof uit tabletten uraniumdioxyde (UO_2) dat tot 2 à 3% verrijkt is. Deze tabletten bevinden zich in metalen buizen van 10 à 12 mm diamater en ca. 3 m lengte. Deze gevulde buizen, de *splijtstofstaven*, worden samengevoegd tot *splijtstofelementen* (figuur 1). Enkele honderden splijtstofelementen vormen de kern van de reactor die zich in een met water gevuld groot stalen vat bevindt. Het water heeft twee functies: het voert de in de reactorkern geproduceerde warmte af en dient als remstof voor de neutronen. Bij een kokendwaterreactor (figuur 2) wordt in de zogenaamde *primaire kringloop* bij 280 °C en een druk van 70 bar (1 bar is ongeveer 1 atmosfeer) in de reactorkern stoom geproduceerd, waarmee een turbine-generatoreenheid wordt aangedreven. Na expansie in de turbine wordt de stoom gecondenseerd en als water teruggepompt naar het reactorvat.



Figuur 1
Splijtstofelement van een lichtwaterreactor
***1* regelstaaf; *2* afstandsrooster; *3* splijtstofstaaf**



Figuur 2
Schema van een kokendwaterreactor
***1* splijtstofkern; *2* regelstaven; *4* circulatiepomp; *5* turbine;**
***6* condensor; *7* generator; *8* herverhitter.**



Figuur 3
Schema van een drukwaterreactor
***1* splijtstofkern; *2* regelstaven; *3* warmtewisselaar; *4* circulatiepomp; *5* turbine; *6* condensor; *7* generator; *8* herverhitter.**

Bij een drukwaterreactor (figuur 3) is de temperatuur in het reactorvat ca. 300 °C, maar bedraagt de druk ca. 160 bar, zodat geen stoomvorming optreedt. De stoom wordt hier niet in de primaire kringloop gevormd, maar in een stoomgenerator, waarin primaire en secundaire kringloop van elkaar zijn gescheiden. De in de secundaire kringloop gevormde stoom wordt naar de turbine geleid.
Het rendement van de omzetting van de geproduceerde warmte in elektrische energie is ongeveer 33%. Men dient dus onderscheid te maken tussen het *thermisch vermogen* (in MW = megawatt = miljoen watt) van een kernreactor, d.i. de hoeveelheid per tijdseenheid geproduceerde energie, en het *elektrisch vermogen*, d.i. het aantal megawatt dat in de vorm van elektrische energie wordt geproduceerd (gewoonlijk aangeduid met MW(e)). Een reactor met een vermogen van 3.000 MW levert dus een elektrisch vermogen van ongeveer 1.000 MW(e).
Zwaarwaterreactoren (figuur 4) bestaan uit een groot vat, dat met zwaar water is gevuld dat als moderator dient; in dit vat steken horizontale buizen waarin zich de splijtstofelementen bevinden. Door de buizen stroomt zwaar water of licht water dat als koelmiddel dient; koelmiddel en moderator zijn dus van elkaar gescheiden. Het koelmiddel staat onder vrij hoge druk en draagt, net als bij de drukwaterreactor, zijn warmte af in een stoomgenerator. Het reactorvat staat maar onder geringe druk aangezien de moderator op vrij lage temperatuur blijft. Zoals al eerder werd opgemerkt, kunnen deze reactoren op natuurlijk uranium werken dankzij de zeer geringe neutronenabsorptie in zwaar water.
Bij grafietreactoren worden de functies van remstof en koelmiddel altijd gescheiden, aangezien grafiet een vaste stof is. In de meeste grafietreactoren wordt gaskoeling toegepast, wat het voordeel heeft dat aanzienlijk hogere temperaturen kunnen

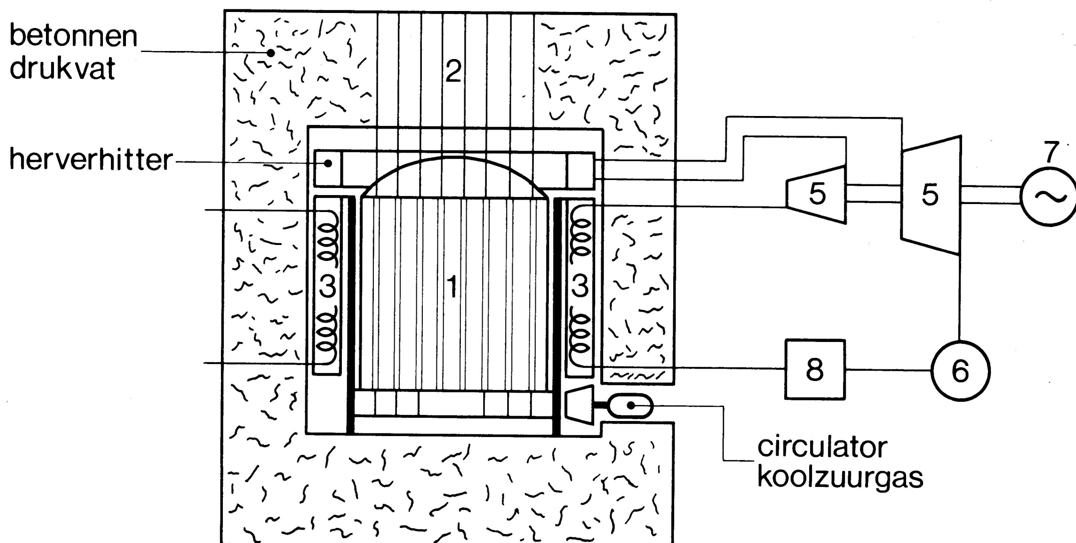
Figuur 4
Schema van een zwaarwaterreactor
_1_ splijtstofkern; _2_ regelstaven; _3_ warmtewisselaar; _4_ circulatiepomp; _5_ turbine; _6_ condensor; _7_ generator; _8_ herverhitter.

---

worden bereikt dan in waterreactoren. Dankzij de hogere temperatuur kan een hoger rendement worden behaald bij de omzetting van thermische in elektrische energie (tot meer dan 40%). Dit was nog niet in het geval bij oudere typen grafietreactoren, die met kooldioxyde (CO_2) werden gekoeld waarbij de temperatuur gelimiteerd was tot ca. 390 °C. In de modernste grafietreactoren (figuur 5) wordt heliumkoeling toegepast tot temperaturen van 750-900 °C; dit helium wordt naar een stoomgenerator geleid, maar zal in de toekomst waarschijnlijk voor directe aandrijving van een gasturbine kunnen zorgen. De splijtstof is hier in de vorm van ca. 1 mm grote korreltjes in grafietblokken ingebed. In de grafietblokken bevinden zich koelkanalen waardoor het helium stroomt. Een voordeel van deze opbouw is onder meer dat zich weinig constructiematerialen in de kern bevinden, waardoor ook weinig neutronen nutteloos worden weggevangen en een betere splijtstofbenutting kan worden gerealiseerd.

Splijtstofbenutting

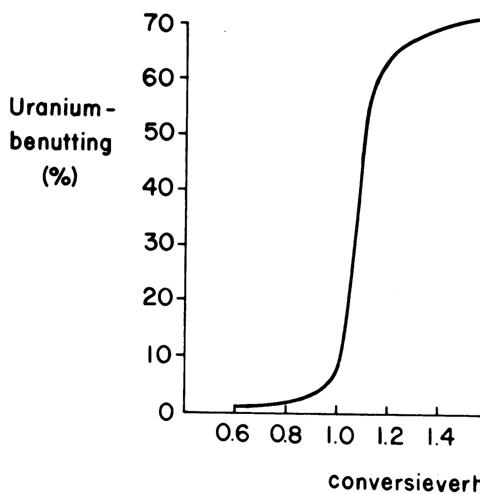
Onze erfenis van de schepping bevat maar één splijtbare kernsoort: ^{235}U. Dit betekent echter niet, dat slechts 0,7% van alle uraniumkernen verspleten kan worden, want reeds eerder is opgemerkt dat door absorptie van neutronen in ^{238}U dit materiaal wordt omgezet in goed splijtbaar plutonium; men noemt dit een *conversiereactie*. Dankzij deze conversie kunnen in beginsel alle uraniumkernen worden verspleten. Daarvoor is echter nodig dat de verhouding tussen de aantallen reacties (b) en (a), de zogenaamde *conversiefactor* of *conversieverhouding* in de reactor, tenminste gelijk is aan één. Alleen dan immers wordt iedere splijtbare kern die door



Figuur 5
Schema van een grafietreactor
1 **splijtstofkern;** ***2*** **regelstaven;** ***3*** **warmtewisselaar;** ***5*** **turbine;**
6 **condensor;** ***7*** **generator;** ***8*** **herverhitter.**

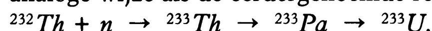
een reactie (a) verloren gaat door een nieuwe vervangen. Ligt de conversiefactor beneden één dan zal men uiteindelijk met niet-verspleten ^{238}U blijven zitten: het natuurlijk uranium is dan niet volledig benut. In de loop van het conversieproces zal geleidelijk worden overgegaan van ^{235}U-versplijting naar ^{239}Pu-versplijting, zodat men de conversiefactor meer algemeen moet definiëren als de verhouding tussen produktie en verbruik van splijtbare kernen.

Figuur 6 toont de uraniumbenutting (het percentage uraniumkernen dat verspleten kan worden) als functie van de conversiefactor. Hieruit blijkt duidelijk het belang van een hoge conversiefactor. Deze kan worden bereikt door te zorgen dat zoveel mogelijk neutronen voor de conversiereacties beschikbaar zijn, dat wil zeggen door een hoge neutronenopbrengstfactor bij de reactie (a) en door zuinig omspringen met de neutronen zodat zoveel mogelijk neutronen reacties van het



Figuur 6
Uraniumbenutting als functie van de conversieverhouding

type (b) kunnen veroorzaken, uiteraard onder de randvoorwaarde dat ook de kettingreactie nog op gang moet worden gehouden. Het 'zuinig zijn met neutronen' impliceert dat zoveel mogelijk materialen moeten worden gebruikt die weinig neutronen wegvangen. Voor een conversiefactor groter dan één (men spreekt dan van een 'kweekreactor') is echter noodzakelijk dat de neutronenopbrengstfactor groter dan ca. 2,25 wordt. Dit is mogelijk door de splijtingen te laten veroorzaken door neutronen, die niet of slechts in geringe mate afgeremd zijn. Tabel II geeft de ètafactor voor drie splijtstoffen en thermische en snelle neutronen, waaruit als 'recept' volgt: neutronen niet afremmen en plutonium gebruiken. Op deze principes berust de snelle kweekreactor, waarbij de aanduiding 'snel' dus betrekking heeft op de neutronen, die nauwelijks worden afgeremd.
In tabel II maken we ook kennis met een nieuwe splijtstof: ^{233}U, die evenmin als plutonium in de natuur voorkomt, maar gevormd kan worden uit thorium op een analoge wijze als de eerdergenoemde reactie (a):



$^{232}Th + n \rightarrow {}^{233}Th \rightarrow {}^{233}Pa \rightarrow {}^{233}U.$

Tabel II. Neutronenopbrengstfactor voor drie splijtstoffen.

Splijtstof	Neutronen	
	thermisch	snel
^{235}U	2,07	2,1
^{239}Pu	2,10	2,7
^{233}U	2,27	2,4

Na vangst van een neutron gaat het thorium-232 over in thorium-233, dat in een tweetraps bètaverval via protactinium overgaat in uranium-233. Het bijzondere van deze uraniumisotoop is de hoge ètafactor voor thermische neutronen (tabel II), zodat met deze splijtstof zelfs in een thermische reactor een hoge conversiefactor kan worden behaald, al zal van echt 'kweken' geen sprake kunnen zijn. In de hogetemperatuur gasgekoelde grafietreactor streeft men naar gebruik van thorium, dat dan gemengd moet worden met hoog-verrijkt uranium, omdat anders neutronenvangst in ^{238}U teveel concurreert. Omdat de conversiefactor beneden één blijft, zal dit reactortype altijd moeten worden 'bijgevoed' met ^{235}U.

Tabel III. Conversiefactoren (C) van verschillende reactortypen.
GCR = gasgekoelde grafietreactor (Gas Cooled Reactor).

	C
LWR	0,5-0,6
GCR	0,8
HWR	0,9
FBR	1,2-1,4

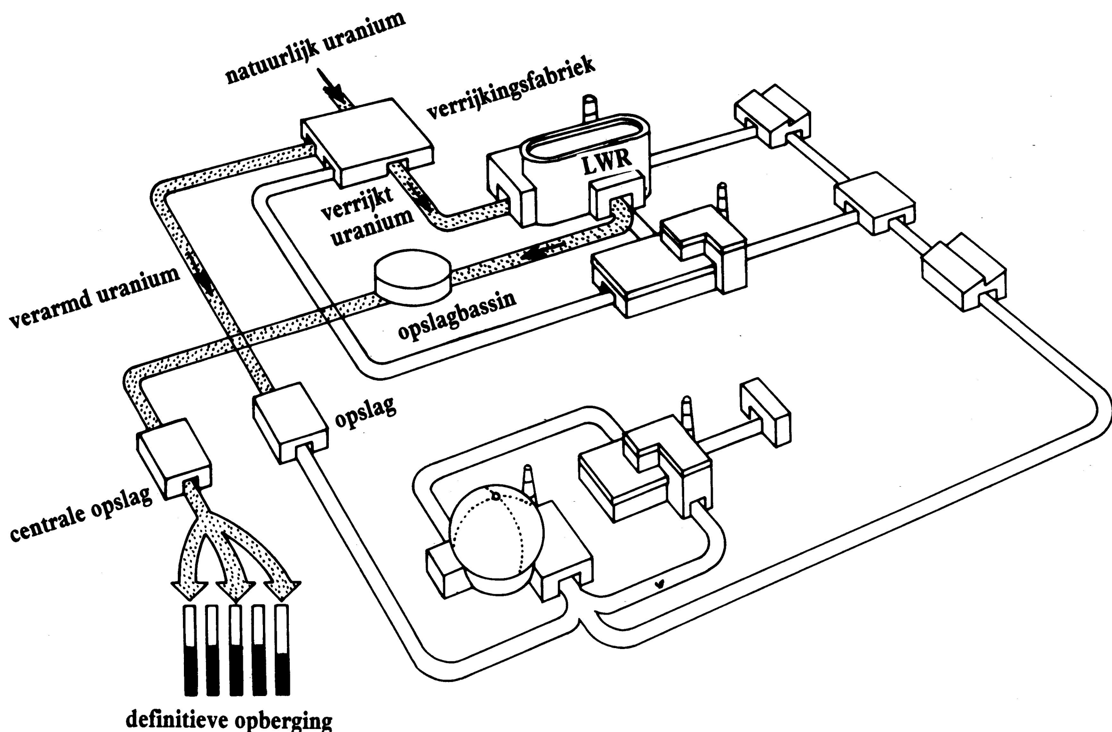
Tabel III geeft de conversiefactoren van de verschillende reactortypen. Het slechtst in dit opzicht zijn de lichtwaterreactoren, vanwege de al eerder genoemde neutronenabsorptie in gewoon water. Zwaar water en grafiet zijn veel zuiniger met neutronen zodat de conversiefactor dichter bij één komt. De snelle kweekreactor heeft de mogelijkheid van een conversiefactor van 1,2 tot 1,4 en is dus het enige reactortype dat het natuurlijk uranium bijna volledig zal kunnen benutten. Het in deze reactoren benodigde plutonium zal echter eerst in thermische reactoren moeten worden geproduceerd.

Plutoniumproduktie in thermische reactoren

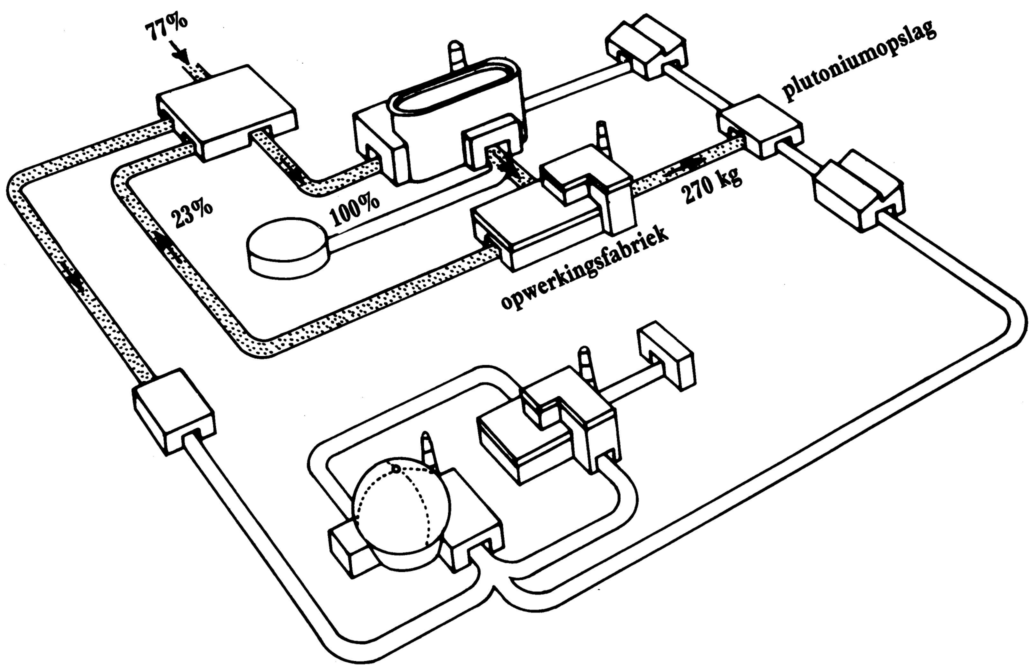
Het in een reactor via conversiereacties geproduceerde plutonium zal voor een deel verspleten worden zolang het in de reactor blijft. Per 1.000 MW(e)-jaar elektriciteitsproduktie ziet de plutoniumbalans voor een drukwaterreactor er als volgt uit:

plutonium-vorming	710 kg
plutonium-verbruik	440 kg –
Netto plutonium-produktie	270 kg

Onder de netto-produktie verstaan we de hoeveelheid plutonium die zich in de 'verspleten' splijtstofelementen bevindt die uit de reactorkern worden afgevoerd. In aanmerking nemende dat per 1.000 MW(e)-jaar in een drukwaterreactor ongeveer 1.300 kg splijtstof wordt verbruikt, blijkt dat ongeveer éénderde van de energieproduktie in een dergelijke reactor uit plutonium wordt verkregen.
Grafiet- en zwaarwaterreactoren kunnen een aanzienlijk hogere netto-plutoniumproduktie halen, omdat de conversiefactor veel hoger ligt door het zuinige omspringen met de neutronen en bovendien het eigen plutoniumverbruik lager ligt. Gasgekoelde grafietreactoren met natuurlijk uranium kunnen netto per 1.000 MW(e)-jaar ca. 620 kg plutonium produceren, bij zwaarwaterreactoren bedraagt dit ca. 500 kg.



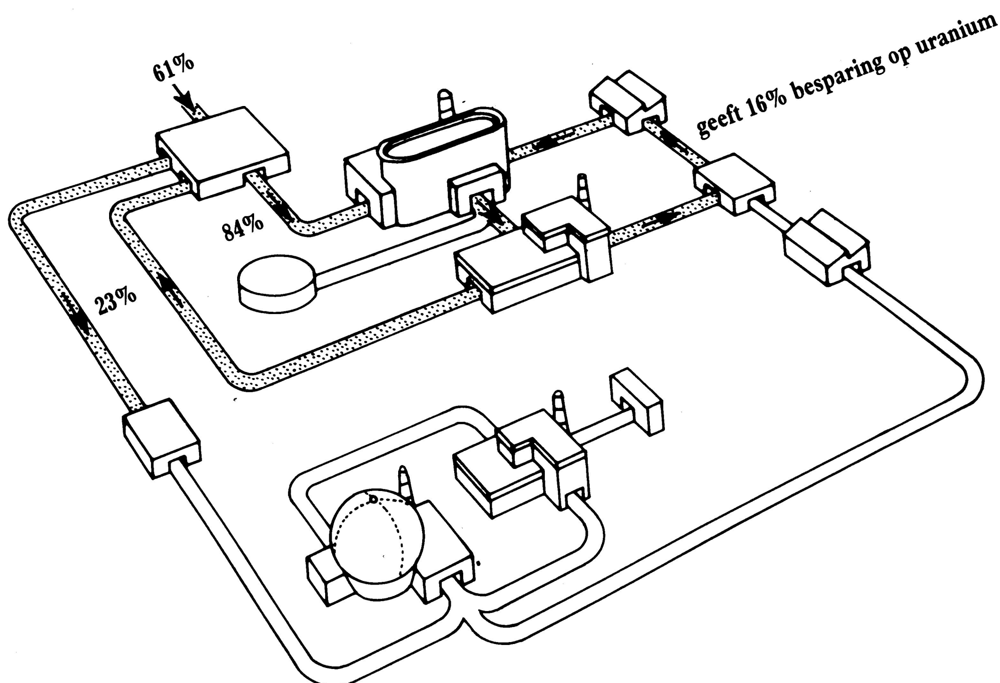
Figuur 7
De wegwerpcyclus met een lichtwaterreactor



Figuur 8
Splijtstofcyclus met hergebruik van uranium

Splijtstofcycli van lichtwaterreactoren

Onder de splijtstofcyclus verstaat men het geheel van processen van de winning van splijtstof uit ertsen tot aan het opbergen van het radioactieve kernsplijtingsafval. Deze term is ingeburgerd geraakt, hoewel er lang niet altijd sprake is van cyclische processen. Een voorbeeld daarvan geeft figuur 7 waarin de zogenaamde wegwerpcyclus is uitgebeeld (1). Het natuurlijke uranium gaat eerst naar de verrijkingsfabriek, waaruit twee stromen komen: tot ca. 0,2% verarmd uranium en tot 2 à 3% verrijkt uranium dat naar de reactor gaat. Het verarmde uranium wordt vooralsnog als 'afval' opgeslagen. Na versplijting gaan de splijtstofelementen na een periode van interimopslag in hun geheel naar de definitieve opslag. Deze 'cyclus' wordt wel eens aanbevolen omdat het gevormde plutonium niet wordt afgescheiden, zodat het gevaar van misbruik voor kernwapens wordt vermeden. Afgezien van het feit, dat het plutonium uit lichtwaterreactoren niet goed geschikt is voor dit misbruik, is dit wel een zeer verkwistend systeem, omdat de afgevoerde splijtstofelementen nog veel bruikbaar uranium bevatten (met nog ca. 0,8% ^{235}U) en ook de gehele nettoproduktie aan plutonium. Bovendien vormt het plutonium een lange-termijnrisico in het afval; de veiligste plaats voor plutonium is in een kernreactor, waar het verspleten wordt tot kortlevende splijtingsprodukten.
De wegwerpcyclus verbruikt 212 ton natuurlijk uranium per GW(e)-jaar (= 1.000 MW(e)-jaar), hetgeen betekent dat slechts 0,5% van dit uranium verspleten wordt. Een betere oplossing is het toepassen van opwerking, waarbij de splijtingsprodukten worden afgescheiden van het bruikbare uranium en plutonium. Men kan nu het afgescheiden uranium terugvoeren naar de verrijkingsfabriek, en het plutonium opslaan voor later gebruik in een kweekreactor; dit geeft 23% besparing in het uraniumverbruik (figuur 8). Men kan ook uranium en plutonium beide opnieuw gebruiken, wat een besparing oplevert van 39% (figuur 9).

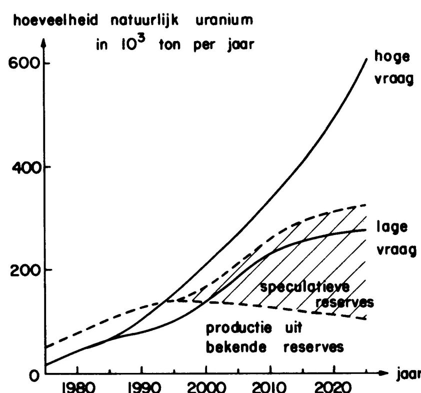


Figuur 9
Splijtstofcyclus met hergebruik van uranium en plutonium

Deze twee alternatieven geven een natuurlijk-uraniumverbruik van 163, respectievelijk 129 ton per GW(e)-jaar. Bij volledig hergebruik wordt ca. 0,8% van het natuurlijke uranium verspleten.

Consequenties

De consequenties van uraniumgebruik als beschreven in het voorgaande zijn geanalyseerd in de zogenaamde INFCE-studie (2) en samengevat in figuur 10. Deze figuur toont de jaarlijkse uraniumvraag bij een laag en hoog nucleair scenario en bij uitsluitend gebruik van thermische reactoren. Het lage scenario komt overeen met nucleaire vermogens van 850 GW(e) in het jaar 2000 en 1.800 GW(e) in het jaar 2025. Voor het hoge scenario zijn de getallen 1.200 GW(e) en 3.900 GW(e). De communistische landen zijn daarbij buiten beschouwing gelaten. In dezelfde figuur is het jaarlijkse produktietempo van uranium weergegeven, zoals dat thans



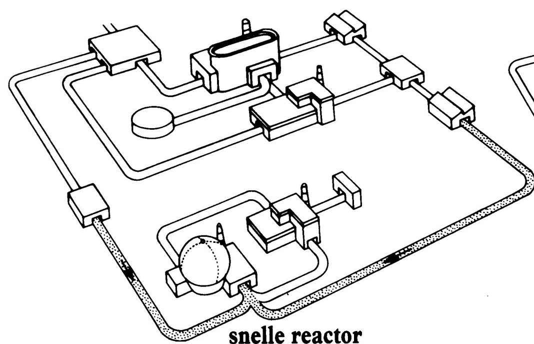
Figuur 10
Jaarlijkse uraniumproduktie en vraag naar uranium, bij uitsluitend gebruik van thermische reactoren (INFCE)

Tabel IV. Natuurlijk-uraniumverbruik van enkele reactortypen.

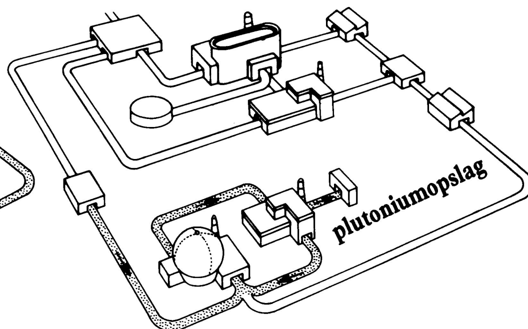
Uraniumverbruik per GW(e)-jaar

LWR	zonder hergebruik	212 ton
	volledig hergebruik	129 ton
HWR	natuurlijk uranium	174 ton
	licht-verrijkt uranium	119 ton
	volledig hergebruik	87 ton
FBR	uranium-plutonium-cyclus	1,5 ton

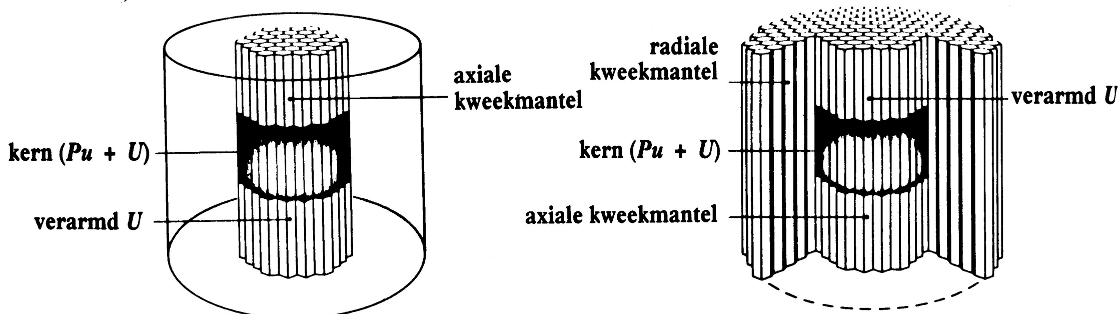
valt te voorzien, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen produktie uit vaststaande reserves en uit speculatieve reserves. Uiteraard is het laatste begrip niet scherp gedefiniëerd, aangezien de omvang van deze reserves afhangt van de prijs die men bereid is te betalen (dus o.a. van de olie- en steenkoolprijzen!). Met inachtneming van de onzekerheden, die altijd aan scenario's kleven, kan toch wel geconcludeerd worden, dat aan het begin van de volgende eeuw knelpunten zullen ontstaan als men de nucleaire scenario's zou realiseren met uitsluitend thermische reactoren. Deze knelpunten zullen vermeden moeten worden door toepassing van reactoren die het uranium beter benutten, dus reactoren met een hoge conversiefactor, in welk opzicht de snelle reactor de kroon spant. In tabel IV is het uraniumverbruik per GW(e)-jaar van de lichtwaterreactor, zwaarwaterreactor en snelle kweekreactor weergegeven, waaruit duidelijk de veel betere uraniumbenutting van de laatste spreekt. Hoe gering het uraniumverbruik van de snelle kweekreactor is, spreekt nog sterker wanneer men het volume van de hoeveelheid verbruikte uranium per 1.000 MW(e)-jaar beschouwt: in oxydevorm vult het één olievaatje ('barrel'). Bovendien mag dit ook verarmd uranium zijn. De consequenties van de minstens zestig maal betere uraniumbenutting zijn uiteraard zeer groot. Het verarmde uranium, dat nu afval is van de verrijkingsfabriek, wordt een waardevolle energiebron. Dit betekent tevens dat de uraniumwinning voor zeer lange tijd kan worden gestopt. Het huidige afvaluranium in de Verenigde Staten vertegenwoordigt bijvoorbeeld een energievoorraad van zes maal de oorspronkelijke olievoorraad in het Midden-Oosten en circa de helft van de enorme binnenlandse steenkolenvoorraad van de VS. Voorts zal de invloed van de uraniumprijs op elektriciteitsproduktiekosten, die bij lichtwaterreactoren al relatief gering is, bij kweekreactoren nog kleiner worden zodat men zich dure winningsmethoden zal kunnen veroorloven, wellicht uit zeewater.



Figuur 11
Lanceercyclus van een snelle reactor



Figuur 12
Gevestigde cyclus van een snelle reactor



Figuur 13
Kern en kweekmantel van een snelle reactor

Snelle reactoren

Voor de introductie van snelle reactoren moet gebruik worden gemaakt van plutonium dat in thermische reactoren is geproduceerd (lanceercyclus, figuur 11). Wanneer de cyclus van de snelle reactor eenmaal gesloten is, hoeft geen plutonium meer te worden toegevoegd en gebruikt de snelle reactor alleen nog natuurlijk uranium of verarmd uranium van de 'afval'-opslag van de verrijkingsfabriek. Dit is de gevestigde cyclus waarin men het verarmde uranium als splijtstof en het plutonium als katalysator kan opvatten (figuur 12). Aangezien de snelle reactor meer plutonium produceert dan hij verbruikt, zal na enige tijd voldoende extra plutonium aanwezig zijn om een nieuwe snelle reactor te kunnen starten; deze tijd noemt men de verdubbelingstijd.
Een snelle reactor ziet er in principe uit als in figuur 13: een kern met splijtstofelementen die een plutonium-uraniummengsel bevatten, omgeven door een kweekmantel met alleen uranium. In sommige nieuwe ontwerpen bevinden zich in de kern ook 'eilanden' van kweekelementen, maar dit doet aan het principe niets af.

Tabel V. Plutoniumbalans van een snelle reactor (alle hoeveelheden in kg per GW(e)-jaar).

Kern				Kweekmantel		
Input	= 1936	= 1936		Input	= 0	
Vorming	= 558		+	Vorming	= 455	+
Totaal	= 2494			Totaal	= 455	
Verbruik	= 789		−	Verbruik	= 34	−
Output	= 1705	= 1705	−	Output	= 421	
		− 231				

balans = 190 kg/GW(e)-jaar

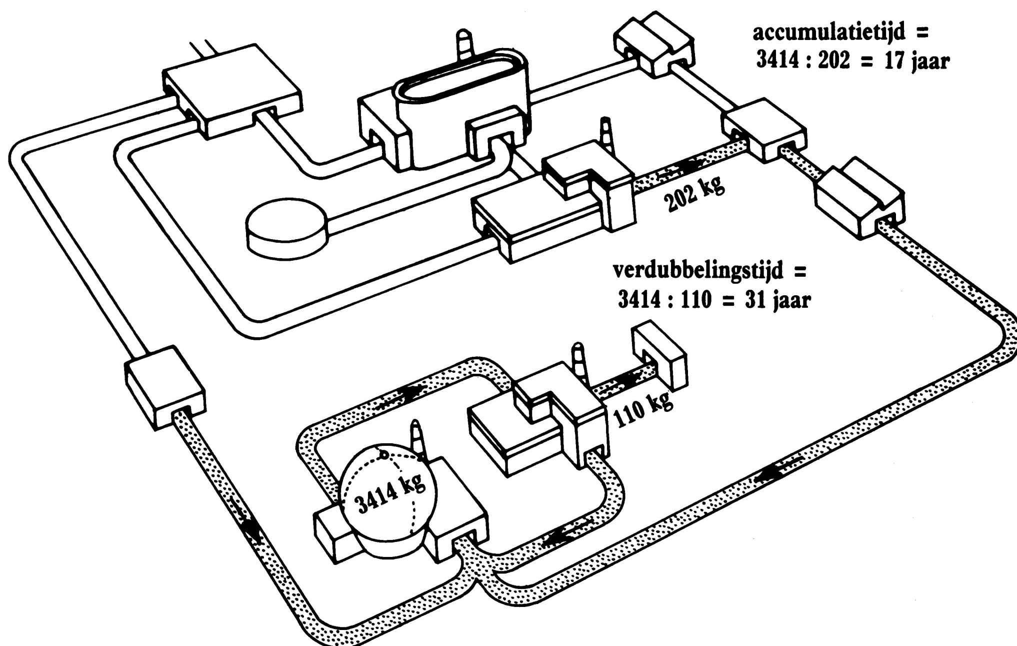
Netto plutonium-'verbranding' zonder kweekmantel = 231 kg/GW(e)-jaar

Maximale produktie met kweekmantel = 190 kg/GW(e)-jaar

Tabel V geeft het 'plutoniumhuishoudboekje' van een snelle reactor: in de kern wordt netto plutonium verbruikt, wat echter door de produktie in de kweekmantel ruimschoots wordt gecompenseerd. De conversiefactor (C) van de reactor van dit voorbeeld is:

$$C = \frac{Pu\text{-produktie}}{Pu\text{-verbruik}} = \frac{558 + 455}{789 + 34} = 1{,}24$$

Deze conversiefactor kan eenvoudig worden verlaagd door de kweekmantel te verkleinen, dat wil zeggen een aantal elementen weg te laten. Op deze wijze kan de reactor bijvoorbeeld zo worden bedreven dat er geen netto-produktie van plutonium is en de reactor alleen in de eigen plutoniumbehoefte voorziet; door de kweekmantel geheel weg te laten werkt de reactor als 'opbrander' van plutonium.



Figuur 14
Gecombineerde splijtstofcyclus van een thermische en een snelle reactor

Samenspel tussen thermische en snelle reactoren

In figuur 14 is het samenspel tussen thermische en snelle reactoren met enkele kwantitatieve gegevens weergegeven. Teneinde tot realistische getallen te komen is aangenomen dat de reactoren een vermogen hebben van 1.000 MW(e) en een capaciteitsfactor (ook wel belastingsfactor genoemd) van 75%, hetgeen wil zeggen dat per eenheid jaarlijks 750 MW(e)-jaar wordt geproduceerd. De snelle reactor is van hetzelfde type als waarop tabel IV betrekking heeft. De totale plutonium-inventaris in de snelle-reactorcyclus is uiteraard aanzienlijk groter dan de in deze tabel vermelde hoeveelheid in de reactor zelf. Delen we de totale inventaris door het jaarlijks produktie-overschot aan plutonium, dan krijgen we de al eerder gedefinieerde *verdubbelingstijd,* in dit geval 3414:110 = 31 jaar. Hierbij is een plutoniumverlies bij de opwerking verdisconteerd; dit komt bij de splijtingsprodukten in het afval terecht.

Naast de verdubbelingstijd is de *accumulatietijd* van belang; dat is de tijd die nodig is om met de thermische reactor de startinventaris aan plutonium voor de snelle reactorcyclus te produceren. Bij gebruik van een lichtwaterreactor bedraagt deze

accumulatietijd zeventien jaar; met een zwaarwater- of grafietreactor zou dit worden gereduceerd tot ruim negen, respectievelijk ruim zeven jaar, hetgeen eenvoudig is na te gaan met behulp van de eerder gegeven getallen voor de netto-plutoniumproduktie in deze reactoren. Voorts valt op, dat thermische reactoren als plutoniumproducent voor andere reactoren veel effectiever zijn dan snelle reactoren!

De verdubbelingstijd van de snelle reactor in het voorbeeld is veel te lang in verhouding tot de gewenste verdubbelingstijden bij introductie van dit reactortype in de elektriciteitsproduktie. Wanneer men eenmaal een groter aantal reactoren heeft, zal de verdubbelingstijd afnemen omdat nu het plutoniumoverschot van alle snelle reactoren tezamen onmiddellijk kan worden geïnvesteerd in een nieuwe reactor, de 'spaartijd' vervalt dus. Hierdoor kan de verdubbelingstijd voor een groot snelle-reactorpark afnemen tot circa 70% van de 'lineaire' verdubbelingstijd; in het gegeven voorbeeld tot tweeëntwintig jaar. Om tot meer acceptabele verdubbelingstijden te komen is verdere ontwikkeling nodig in twee richtingen: opvoering van de conversiefactor en verkleining van de plutoniuminventaris in de cyclus. Er bestaan al ontwerpen met een lineaire verdubbelingstijd van circa achttien jaar (1). Alle getallen overziende is wel duidelijk dat de splijtstofvoorziening een beperkende factor kan worden bij de introductie van snelle kweekreactoren.

Referenties

(1) W. Marshall, The Use of Plutonium, *Atom 282*, april 1980, blz. 88-103.
W. Marshall, Fast Reactors, *Atom 287*, september 1980, blz. 222-230.

(2) *Report of the International Fuel Cycle Evaluation,* International Atomic Energy Agency, Wenen 1980 (9 delen).

Literatuur

S.E. Hunt, *Fission, Fusion and the Energy Crisis,* Pergamon Press, Oxford 1980

J.J. Duderstadt, *Nuclear Power*, Marcel Dekker Inc., New York 1979.

S. Glasstone and W.H. Jordan, *Nuclear Power and its Environmental Effects,* ANS, Chicago 1980.

3. DE KERNENERGIECENTRALE DODEWAARD

S.H. Woldringh

De eerste kernenergiecentrale in Nederland bevat een betrekkelijk kleine kokendwaterreactor. De installatie is in de jaren zestig grotendeels door de Nederlandse industrie gebouwd om tijdig eigen ervaring op te doen voor de toen verwachte grootschalige uitbouw van kernenergie. Die verwachting is niet gerechtvaardigd gebleken. Thans dient de centrale, die maar een bescheiden deel van de elektriciteitsproduktie voor zijn rekening neemt, om de opgedane kennis en ervaring te bewaren tot het moment dat een besluit is genomen over de toekomst van kernenergie in Nederland. Om een aantal redenen maakt de kleine omvang de kernreactor veiliger dan grote reactoren. De complexheid is echter voldoende groot om een goede leerschool te zijn voor personeel, overheid en industrie. Het reactorbedrijf is sinds vele jaren praktisch probleemloos en de cumulatieve beschikbaarheid van 83% behoort tot de hoogste van de kokendwaterreactoren ter wereld. Ontwikkeld werden onder andere afvalbehandeling en registratie van opgelopen stralingsdoses, terwijl veel praktische kennis is vergaard over de splijtstofbehandeling. De centrale is het gemeenschappelijk eigendom van een groot aantal energiebedrijven.

Inleiding

Voor het waarborgen van een bedrijfszekere, veilige en zo economisch mogelijke elektriciteitsvoorziening is in de loop der jaren tussen de elektriciteitsbedrijven een hechte samenwerking tot stand gekomen. Uit deze samenwerking zijn een aantal instellingen ontsproten, die in het raam van deze gezamenlijke activiteiten een bepaalde taak vervullen. Zo is in 1927 de NV tot Keuring van Elektrotechnische Materialen (NV KEMA) opgericht. Binnen deze NV wordt veel van het keurings- en speurwerk voor de elektriciteitsbedrijven verricht. In het kader van dit speurwerk ging de NV KEMA zich reeds in 1946 bezig houden met de mogelijke toepassing van kernenergie. In 1949 werd de NV Samenwerkende Elektriciteits Produktiebedrijven (NV SEP) opgericht, met als taak de coördinatie van de Nederlandse centrales door middel van het koppelnet.

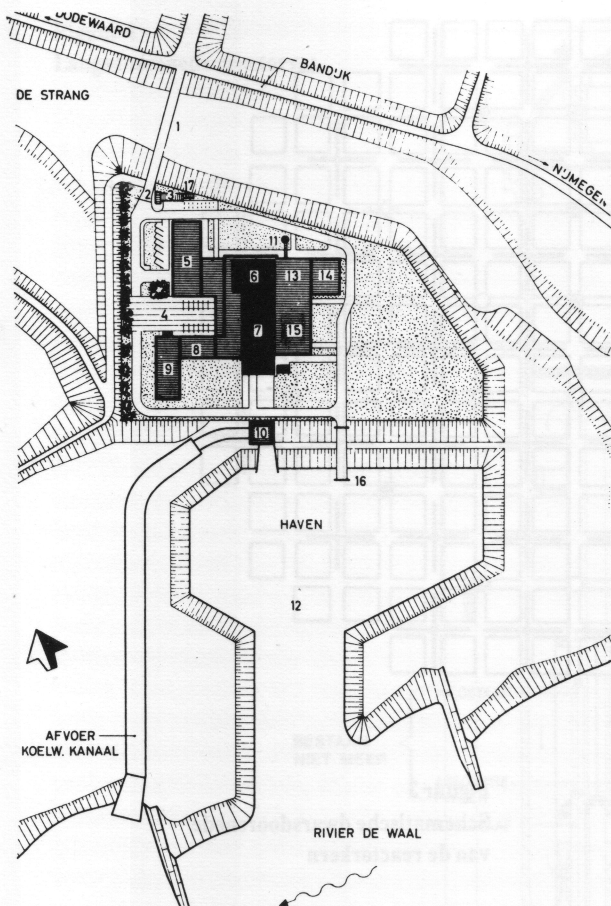
Toen de ontwikkeling van de kernenergie in de jaren vijftig in een zodanig stadium was gekomen, dat men in verschillende landen de bouw van kernenergiecentrales overwoog, heeft in SEP-verband een onderzoek plaatsgevonden teneinde na te gaan of toepassing van kernenergie voor het opwekken van elektrische energie technisch en economisch aanvaardbaar kon worden geacht. Men richtte zich aanvankelijk op een zelf te ontwikkelen thermische kweekreactor, waarvoor de KEMA suspensietestreactor (KSTR) werd gebouwd (1). Toen het duidelijk werd dat deze ontwikkeling niet zo snel tot een praktisch te realiseren ontwerp zou leiden, besloten de elektriciteitsbedrijven over te gaan tot de bouw van een eenvoudiger lichtwaterreactor van een beproefd type met een elektrisch vermogen van ongeveer 50 MW. Deze centrale zou een relatief geringe kapitaalsinvestering vergen, maar zou qua vermogen toch voldoende groot zijn om de ervaring op te doen, die in de toekomst nodig zou zijn voor de bouw en de exploitatie van grotere kernenergiecentrales.

Op 2 februari 1965 werd de NV Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland (NV GKN) opgericht, met als doel het in eigen beheer ontwerpen, bouwen, in bedrijf stellen en bedrijven van deze centrale. Een van de belangrijkste oogmerken

van het project was zoveel mogelijk zelf doen. Zo werd met de Amerikaanse firma General Electric een contract gesloten voor de levering van alleen de nucleaire *know-how*, waarbij werd bedongen dat deskundigen van de elektriciteitsbedrijven in Californië konden deelnemen aan het nucleaire ontwerp.
Een belangrijk bij-oogmerk van het project was de Nederlandse industrie in te schakelen bij wat gezien werd als een belangrijke industriële innovatie. Dit is ook op grote schaal gebeurd. Essentiële nucleaire componenten zoals het reactorvat, de splijtstofelementen, de nucleaire instrumentatie en het gehele mechanisme dat de kernreactie regelt werden in Nederland vervaardigd. Hierdoor heeft de Nederlandse industrie zich vertrouwd kunnen maken met specifieke fabricage-methoden en met de stringente eisen die gesteld moeten worden aan de vervaardiging van nucleaire componenten. De bij de bouw van de Dodewaard-centrale opgedane ervaring heeft er mede toe geleid dat bij de Nederlandse industrie belangrijke buitenlandse orders op kerntechnisch gebied werden geplaatst. Ook voor de toezichthoudende autoriteiten was de Dodewaard-centrale een belangrijk ervaringsobject. Door de wil, op deze nieuwe technologie in te spelen, hebben de eigen verantwoordelijkheid en de kritische opstelling van de overheid niet tot belangrijke vertragingen geleid.
Gedurende de bouw van de centrale, die niet meer dan drieëneenhalf jaar in beslag nam, werd veelvuldig in het openbaar verslag gedaan van de opzet en de systemen van deze eerste kernenergiecentrale in Nederland. Hiervoor zij onder meer verwezen naar artikelen uit 1967 (2) en uit 1968 (3).
In de laatste weken van 1968 onderging de centrale de SEP-bedrijfsvaardigheidsproef voor levering van elektriciteit aan het landelijke net en sindsdien is de centrale in geregeld bedrijf. De eerste ervaringen werden vastgelegd in vier openbare artikelen uit 1970 (4). Na vijf jaar bedrijf werd tijdens een symposium gerapporteerd over in het bijzonder de ervaringen opgedaan bij inspectie en onderhoud van de installatie, terwijl nog weer later uitvoerig werd gerapporteerd over de inmiddels zeer ver ontwikkelde inspectietechnieken (5).

Algemene beschrijving

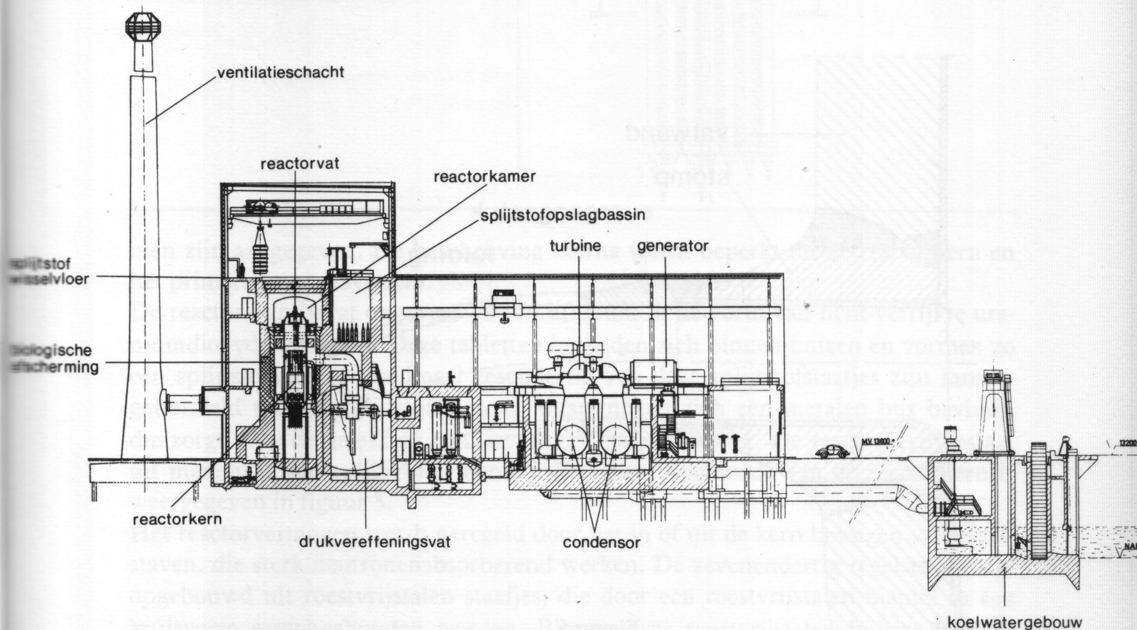
De centrale bevindt zich op een aan de rivier de Waal gelegen terrein in de Hiense uiterwaarden bij Dodewaard. Het terrein ligt binnen de Waalbandijk en wordt van de rivier gescheiden door de zomerdijken. Het eigenlijke centrale terrein is opgehoogd tot een hoogte van 13,2 meter boven NAP (dijkhoogte is 13 meter boven NAP) en is via een brug toegankelijk. De toegang over de rivier is mogelijk via de haven, waarbij zich het pompgebouw voor de aanvoer van het koelwater bevindt. De afvoer van het koelwater vindt plaats via een open kanaal, stroomafwaarts van de haveningang (zie figuur 1).
Voor een uiteenzetting van het principe van een kernsplijtingsreactor zij verwezen naar hoofdstuk 2. De Dodewaard-reactor is een thermische kokendwaterreactor. Bij een dergelijke reactor wordt water gebruikt voor het modereren van neutronen en tevens voor het koelen van de kern. De in de reactorkern geproduceerde stoom wordt direct naar de turbine geleid. De constructies binnen het reactorvat zijn zodanig, dat het water ten gevolge van natuurlijke circulatie door de kern stroomt; er zijn dus geen pompen nodig voor het circuleren van de koelstof. Het ontbreken van deze pompen en van aparte stoomgeneratoren resulteert in een relatief eenvoudige installatie. Dit type reactor heet kokendwaterreactor met natuurlijke circulatie.
Een uniek veiligheidsaspect hierbij is de isolatie-condensor. Dankzij de natuurlijke circulatie is het mogelijk om de uit de reactorkern komende vervalwarmte, zonder gebruik van pompen of elektrische voeding, af te voeren met bijvoorbeeld deze speciale condensor en zo de reactor van druk af te brengen.
Figuur 2 toont een dwarsdoorsnede van de centrale, waarin de belangrijkste syste-

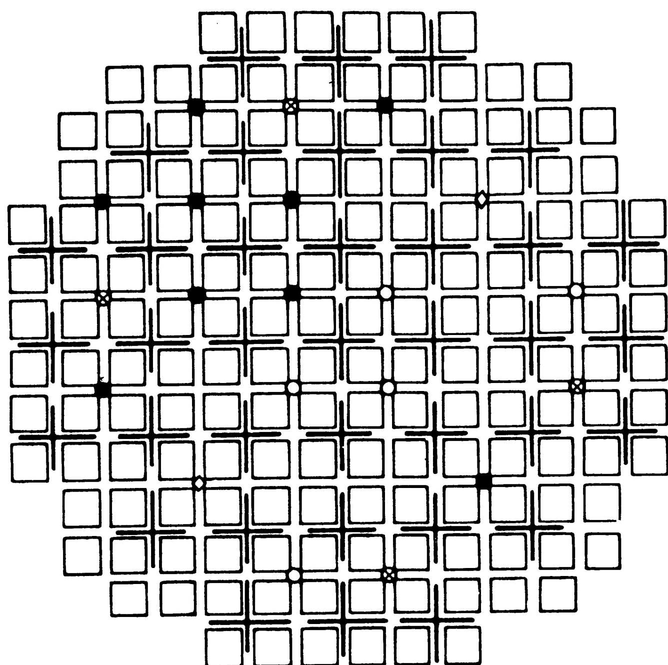


Figuur 1
Ligging en indeling gebouwen van de GKN-centrale:

1 toegangsweg over de Strang;
2 portiersloge;
3 rijwielstalling;
4 parkeerterrein;
5 werkplaatsen en magazijnen;
6 reactorgebouw;
7 turbinegebouw;
8 kantine en ontvangstruimte;
9 kantoorgebouw;
10 koelwatergebouw;
11 ventilatieschacht;
12 haven;
13 ventilatiegebouw;
14 afvalgebouw;
15 nevengebouw;
16 steiger met bokkraan;
17 transformatorhuisje.

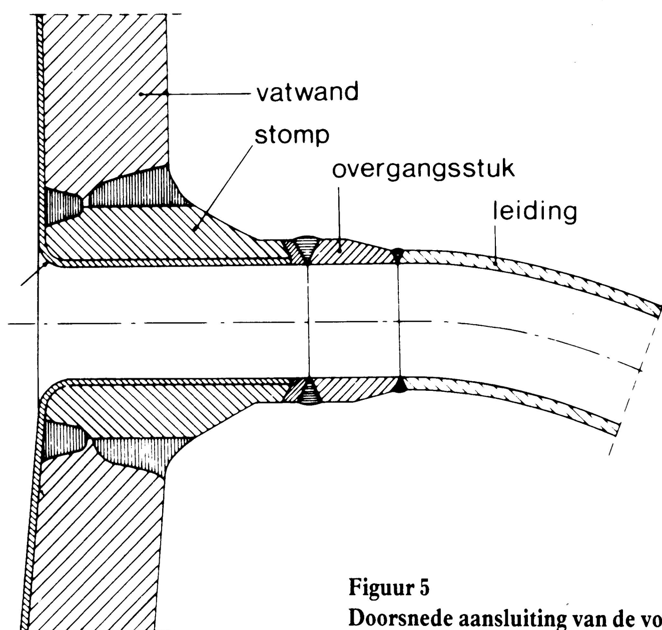
Figuur 2
Dwarsdoorsnede GKN-centrale





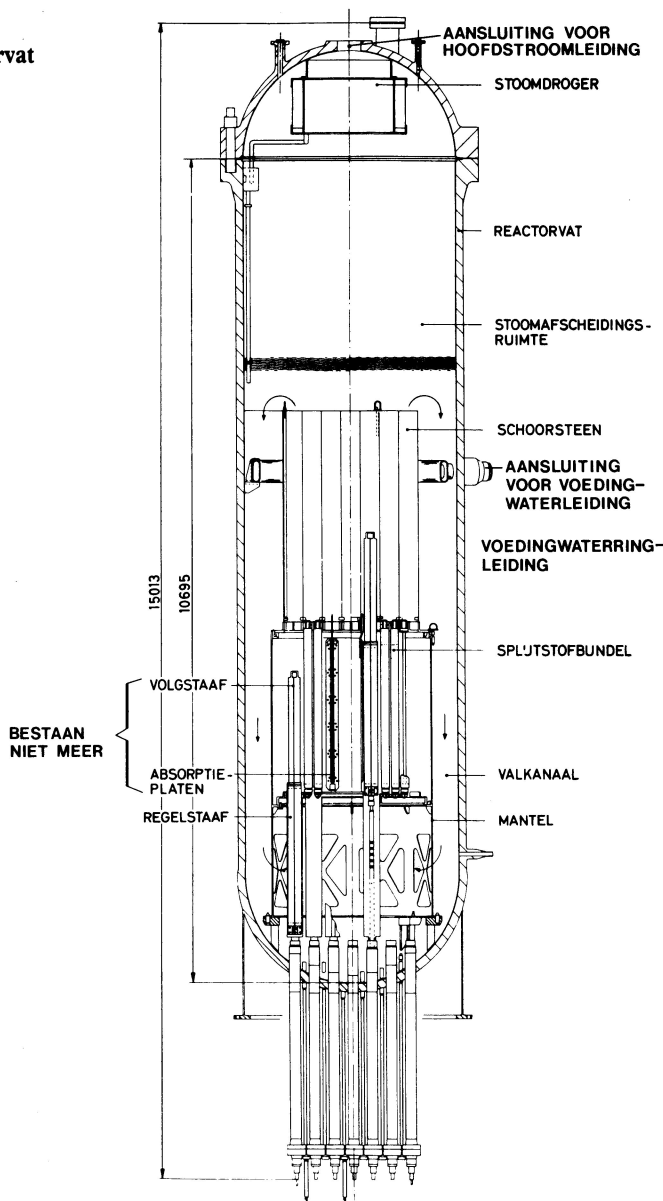
□ splijtstofelement
+ regelstaaf
● bedrijfs kerninstrumentatie
○ speciale kerninstrumentatie
⊗ start bronnen
◇ start kanalen

Figuur 3
Schematische dwarsdoorsnede van de reactorkern



Figuur 5
Doorsnede aansluiting van de voedingwaterleiding aan het reactorvat.

Figuur 4
Langsdoorsnede reactorvat



men zijn aangegeven. De beschrijving hierna wordt beperkt tot de reactorkern en het primaire reactorsysteem.

De reactorkern bevat ongeveer 10 ton uranium in de vorm van licht-verrijkte uraniumdioxyde-tabletten. Deze tabletten bevinden zich binnen buizen en vormen zo een splijtstofstaafje. Maximaal zesendertig van deze splijtstofstaafjes zijn samengebundeld tot een splijtstofelement, waaromheen zich een metalen bus bevindt, die zorgt voor de geleiding van het langsstromende water. De reactorkern bestaat uit maximaal 164 splijtstofelementen. Een dwarsdoorsnede van de reactorkern is weergegeven in figuur 3.

Het reactorvermogen wordt geregeld door het in of uit de kern bewegen van regelstaven, die sterk neutronenabsorberend werken. De zevenendertig regelstaven zijn opgebouwd uit roestvrijstalen staafjes, die door een roestvrijstalen mantel in een kruisvorm samengehouden worden. Binnen deze roestvrijstalen buisjes bevindt zich boriumcarbide voor het absorberen van neutronen. Met behulp van de regelstaven kan de reactor in elke situatie onderkritisch gemaakt worden.

Elk jaar wordt de reactorkern gedeeltelijk herladen. De plaats van de nieuwe elementen in de kern, de regelstaafpatronen en de vermogensverdeling voor de komende splijtstofcyclus worden voor het begin van elke herlading berekend.
Nieuwe splijtstofelementen komen via de transportsluis het reactorgebouw binnen en kunnen dan in de droge opslagruimte of in het opslagbassin worden geplaatst. Voor het verwijderen van bestraalde elementen uit de reactorkern moeten de betonnen afschermdeksels van het splijtstofwisselbassin en de deksels van de reactorkamer en het reactorvat verwijderd worden. De bestraalde splijtstofelementen kunnen dan via het met water gevulde wisselbassin en een sluis naar het splijtstofopslagbassin getransporteerd worden. De elementen blijven minimaal een half jaar in het opslagbassin tot ze, in daarvoor bestemde transportvaten, voor verwerking of opslag elders, afgevoerd worden.
Het primaire reactorsysteem dient te zorgen voor voldoende koeling van de reactorkern en te functioneren als barrière tegen het vrijkomen van radioactieve stoffen. Het belangrijkste onderdeel van het primaire systeem is het reactorvat (zie figuur 4). Dit vat is grotendeels met water gevuld. Tijdens bedrijf van de centrale wordt de in de reactorkern opgewekte warmte door het stoom-watermengsel afgevoerd. De gevormde stoom verlaagt het soortelijk gewicht van het mengsel dat door de reactorkern stroomt. Nadat het mengsel de eigenlijke kern verlaten heeft, komt het in de schoorsteen. De stoom wordt boven de schoorsteen door de zwaartekracht gescheiden van het water, waarna deze via een waterafscheider aan de bovenzijde van het vat wordt afgevoerd naar de turbine.
Door het valkanaal, dat gevormd wordt door het reactorvat enerzijds en de schoorsteen en de mantel rondom de reactorkern anderzijds, stroomt water met een weinig stoom naar beneden. De meegesleurde stoom wordt gecondenseerd door het voedingwater dat in deze ruimte wordt geïnjecteerd. Door het verschil in soortelijk gewicht van de massastromen in de reactorkern en het valkanaal komt de circulatie tot stand. Deze natuurlijke circulatie is voldoende om de reactorkern te koelen.
In de Dodewaard-reactor worden, zoals bij elke kokendwaterreactor, de regelstaven van onder door het reactorvat naar binnen gevoerd. Het primaire systeem is voorzien van veiligheidskleppen, die de druk, die in het systeem kan ontstaan, begrenzen. De centrale is ontworpen voor een thermisch vermogen van 183 MW; de ontwerpdruk van het primaire systeem bedraagt 88,9 bar, de werkdruk zal maximaal echter ongeveer 80 bar bedragen.
De belangrijkste leidingen op het reactorvat zijn:
- de hoofdstoomleiding naar de turbine
- de leiding van het voedingwatersysteem
- de leiding naar het reactorwaterzuiveringssysteem
- de leidingen van het kerninundatiesysteem
- de leiding naar het reactorafkoelsysteem
- de terugvoerleiding van het noodcondensatiesysteem
- de leiding van het neutronengifsysteem.

Enkele van genoemde aansluitingen hebben aanvankelijk enige problemen gegeven door het optreden van haarscheurtjes. Figuur 5 geeft een doorsnede van de overgang reactorvat-leiding. Begin 1972 trad bij een drukbeproeving na de splijtstofwisseling druppellekkage op in een van deze overgangsstukken. De conditie van de overige overgangsstukken werd vervolgens met ultrageleid onderzocht en periodiek met steeds verder verfijnde inspectietechnieken heronderzocht. Over deze inspectietechnieken werd uitvoerig gerapporteerd (5). Zes overgangsstukken zijn inmiddels verwijderd en vervangen door stukken van beter (spannings)corrosie-resistent materiaal.

De leidingen van de systemen, die direct verbonden zijn met het primaire systeem, hebben minimaal twee afsluiters, waarvan er bij een naar het vat toegaande stroming één als terugslagklep is uitgevoerd.
Het reactorvat en de aansluitende leidingen vormen een belangrijke barrière voor de radioactiviteit, die in de reactorkern ontstaat als gevolg van het versplijtingsproces. Een volgende belangrijke barrière wordt gevormd door het insluitsysteem (zie figuur 2) en de hierin zojuist genoemde isolatie-afsluiters.
Bij de centrale Dodewaard is voor het insluitsysteem gebruik gemaakt van het condensatie-drukvereffeningsprincipe. Daarbij bevindt het primaire systeem zich binnen een stalen vat, de reactorkamer, dat door twee grote overstroomleidingen verbonden is met twee grote met water gevulde drukvereffeningsvaten (zie figuur 2). Bij een verlies van koelmiddel uit het primaire systeem wordt de ontsnapte stoom door het water in deze vaten geleid; hierdoor wordt de druk in het insluitsysteem begrensd.
Er zijn meerdere kernafkoel-, noodkoel- en nakoelsystemen om adequaat te kunnen reageren op verschillende situaties, waarbij de koeling van de kern in gevaar zou kunnen komen. In de situatie dat het normale stoom- en voedingswatersysteem niet meer functioneert en het primaire systeem geïsoleerd wordt kan het isolatiecondensatiesysteem de reactor koelen en van druk af brengen.
Indien door de aanwezigheid van een lek in het primaire systeem water toegevoegd moet worden, dan kan dit gebeuren met het hogedruk voedingwatersysteem of bij kleine lekkages door het regelstaafaandrijfsysteem.
Voor het geval dat de reactordruk snel verlaagd moet worden is er het automatisch drukaflaatsysteem, waardoor het meervoudig lagedruk-kerninundatiesysteem in werking gesteld kan worden.
Bij een breuk in het primaire reactorsysteem komt de warmte in de drukvereffeningsvaten, die gekoeld worden met het drukvereffeningsafkoelsysteem; deze warmte wordt via het gesloten koelwatersysteem naar de rivier geleid.

Ervaringen

Er waren de volgende belangrijke bedrijfsonderbrekingen:

1969 – twee onderbrekingen voor verbeteringen aan de turbine-ontwateringen;
1970 – voortijdige verwijdering van tijdelijke absorptieplaten uit de reactorkern;
– verdere verbetering van de turbine-installatie;
1971 – eerste splijtstofwisseling en reactorvatinspectie;
1972 – geplande splijtstofwisseling en ongeplande reparatie van een overgangsstuk;
– inspectie van overgangsstukken, reparatie van overgangsstukken en aanpassing van de kernconfiguratie;
1973 – splijtstofwisseling, reparatie van een overgangsstuk;
1974 – splijtstofwisseling met verwijdering van regelbladvolgers en reparatie van overgangsstukken;
1975 – splijtstofwisseling;
1976 – reparatie van de hogedruk-turbine na het binnendringen van losgespoelde lasrups;
1977 – splijtstofwisseling, inspectie van de voedingwaterstomp, verbetering van de meting van het reactorvatniveau;
1978 – splijtstofwiseling;
1979 – splijtstofwisseling;
1980 – splijtstofwisseling;
1981 – splijtstofwisseling.

De cumulatieve beschikbaarheid van de GKN-centrale tot medio 1981 bedraagt 83%. Voor een overzicht van de beschikbaarheid van de centrale over de voorgaande twaalf hele jaren zie tabel I.

Tabel I. Overzicht van de beschikbaarheid van de centrale in procenten over de afgelopen twaalf hele jaren

Beschikbaarheid naar uren	1980	1979	1978	1977	1976	1975	1974	1973	1972	1971	1970	1969
Van de reactor per jaar	90,5	90,2	94,7	84,5	100,0	91,6	62,3	83,4	72,7	87,5	85,3	99,8
van de reactor cumulatief	86,9	86,5	86,2	85,3	85,3	83,2	81,8	85,7	86,3	90,8	92,5	99,8
Van de turbine per jaar	90,5	89,5	94,2	83,2	94,1	92,3	62,0	82,8	93,5	89,8	90,6	73,5
van de turbine cumulatief	86,2	86,0	85,6	84,7	84,8	83,5	82,0	86,0	86,8	84,6	82,0	73,5
Van de centrale per jaar	89,4	89,5	94,1	83,2	94,0	90,4	61,9	82,6	68,6	86,7	81,3	73,4
van de centrale cumulatief	83,0	82,3	81,6	80,3	79,9	77,8	75,7	78,5	77,5	80,4	77,3	73,4

Ter vergelijking de volgende, uit 1978 stammende gegevens:

	Nederland	**Verenigde Staten**
Beschikbaarheid conventionele centrales (inclusief reserve beschikbaar)	80% (gemiddeld over 7 jaar, 90 eenheden)	82% (gemiddeld over 10 jaar, 1.000 eenheden)
Beschikbaarheid kernenergiecentrales	80% (gemiddeld over 10 jaar, 2 eenheden)	67% (gemiddeld over 10 jaar, 54 eenheden)

Een normale splijtstofwisseling zonder grote inspectie van het primaire systeem en zonder grote revisies betekent een bedrijfsonderbreking van ongeveer drie weken. In de afgelopen jaren is de centrale enige malen langer uit bedrijf geweest. Benadrukt zij dat de ondervonden moeilijkheden min of meer konden worden voorspeld doordat deze zich reeds bij andere centrales hadden voorgedaan. Uit de bovenstaande lijst van onderbrekingen van het bedrijf blijkt, dat na het verhelpen van deze problemen zich de laatste jaren geen nieuwe problemen van betekenis meer hebben voorgedaan.

Buiten de door de genoemde problemen veroorzaakte niet-beschikbaarheid is de geheel onvoorziene niet-beschikbaarheid zeer laag geweest, hetgeen dan ook duidelijk blijkt uit het goede cumulatieve beschikbaarheidspercentage. De beschikbaarheid tussen de grotere bedrijfsonderbrekingen ligt ten gevolge van slechts enkele zeer korte onderbrekingen tussen 95 en meer dan 99%.

De bedrijfsvoering op zich van de kernenergiecentrale is probleemloos verlopen. De grootste moeilijkheden bij onderhoud en inspectie lagen rond het reactorvat en houden verband met de stralingsvelden en toegankelijkheid. Ervaren is dat bij het ontwerpen van een centrale niet alleen moet worden gelet op een hoge beschikbaarheidsfactor tijdens bedrijf, een hoge veiligheid en een lage lozing van radioactiviteit naar buiten, maar ook op de werkzaamheden die tijdens de revisies en inspecties in hoge stralingsvelden moeten worden uitgevoerd, teneinde revisieduur en opgelopen stralingsdoses te beperken. Naast de *engineered safeguards* zou ook over *engineered maintenance* gesproken moeten worden. De eventuele – dikwijls niet zo veel hogere – extra kapitaalsinvesteringen moeten tijdens de exploitatie van de centrale 'terugverdiend' kunnen worden. Een goed voorbeeld hiervan is het gedrag van de splijtstofelementen; door alle zorg aan ontwerp en kwaliteitscontrole besteed hebben de splijtstofelementen geen enkele restrictie op bedrijf of onderhoud gehad.

In verband met het bovenstaande moet het belang van preventief onderhoud, testen, inspecties en vooral werkvoorbereiding worden beklemtoond. Goed preven-

tief onderhoud en de juiste testen en inspecties verhogen de beschikbaarheid en de veiligheid. Het is mogelijk de centrale na een bedrijfsonderbreking, gedurende welke aan bijna alle systemen is gewerkt, probleemloos op te starten. Het is ook mogelijk de centrale een jaar lang in bedrijf te houden zonder onderbrekingen die te wijten zijn aan onvoldoende onderhoud. De veiligheidssystemen dienen constant paraat te staan; dit wordt gecontroleerd door regelmatige testen tijdens bedrijf van de centrale. Men moet hier overigens wel oppassen dat deze testen hun doel niet voorbijschieten: het blijkt dat elders zeker de helft van turbine-trips en reactorstops aan deze testen zijn toe te schrijven.
Een goede werkvoorbereiding is in een kernenergiecentrale van het allergrootste belang geworden. Om onnodige verkleedpartijen en lange wegen door de toegangscontrole te voorkomen, dient de werker direct al van alle materiaal, aangepaste gereedschappen en tekeningen te worden voorzien. Te voren moet zijn geëvalueerd hoe de werkplaats zo efficiënt mogelijk kan worden ingericht. De werker moet geoefend zijn en volkomen bekend met de te volgen procedures. Dit alles zowel om de op te lopen stralingsbelasting te beperken en de beste kwaliteit van het werk te verkrijgen alsook om de stilstandstijd van een kostbare installatie zo kort mogelijk te doen zijn.
Gememoreerd werd reeds het goede gedrag van de splijtstofelementen, te danken aan goed ontwerp en gedegen kwaliteitscontrole. De ingangsgegevens hiervoor zijn mede verkregen door evaluatie van de eigen ervaring met de vele aspecten die een rol spelen. Er wordt in het splijtstofopslagbassin intensief onderzoek verricht aan bestraalde splijtstofelementen, zowel aan defecte als aan niet-defecte. Dit zogenaamde nabestralingsonderzoek houdt onder meer in: testen op lekkage, visuele inspectie, fotografie, wervelstroommetingen voor defect-indicatie, lengtemetingen van splijtstofkolom, dikte-metingen van splijtstofpen, gammaspectrometrie voor opbrand en vermogensverdeling.
Voor al dit onderzoek, dat op afstand en onder water moet worden uitgevoerd, werd speciale apparatuur ontwikkeld. Voor geselecteerde staven wordt het bovengenoemde niet-destructieve onderzoek aangevuld met verdergaand en eventueel destructief onderzoek in speciaal hiervoor uitgeruste betonnen cellen, zoals bijvoorbeeld op het onderzoekcentrum van het ECN te Petten. Uiteraard wordt tijdens bedrijf de radioactiviteit van geloosde afvalstoffen nauwkeurig gevolgd; vooral de isotopensamenstelling en de mutaties in de radioactviteit als functie van het bedrijf zijn van belang. Als functie van de vermogenshistorie worden berekeningen gemaakt van de belangrijkste eigenschappen van de splijtstofpennen, zoals de gasdruk.
Door correlatie van voorspeld gedrag en waargenomen gedrag ontstaan nieuwe ingangsgegevens voor zowel ontwerp en kwaliteitscontrole alsook voor het reactorfysische bedrijf van de reactorkern, dat er op gericht is om de belasting van de splijtstofelementen zo veel mogelijk te beperken. Het resultaat hiervan is onder meer een zeer lage hoeveelheid geloosde radioactiviteit door de ventilatieschacht.
Tabel II geeft een overzicht van de in RASIN (6) berekende stralingsbelasting van de omgeving en de feitelijke, die volgt uit gemeten lozingen. Men ziet dat individuele doses onder de 0,5 mrem per jaar blijven, wat minder is dan 0,5% van de dosis door natuurlijke achtergrondstraling. Sinds 1967 wordt op vijfentwintig plaatsen rondom de centrale de exposiesnelheid gemeten: er kon geen significante verhoging van het stralingsniveau worden vastgesteld die verband hield met het reactorbedrijf. De gemeten tijdelijke verhogingen in oktober 1976 en in oktober 1977 betroffen *fall-out* van kernbomexplosies in China.
Ook bij de behandeling van in de centrale geproduceerd radioactief afval werd belangrijke ervaring opgedaan. Bij het ontwerp van de centrale is er van uitgegaan dat spoedig meer kernenergiecentrales zouden volgen en er dan ook gecentraliseerde diensten zouden komen voor transport en verwerking van het afval. Toch

Tabel II. Berekende en feitelijke stralingsbelasting van de omgeving

	bronterm in RASIN (Ci/jaar)	gemiddelde lozing 1974-1980 (Ci/jaar)	berekend in RASIN		gecorrigeerd voor lozings tempo	
			maximale individuele dosis (mrem/jaar)	collectieve dosis (mrem/jaar)	maximale individuele dosis (gem.) (mrem/jaar)	collectieve dosis (mrem/jaar)
Lozing via ventilatieschacht						
Edelgassen	10.000	7.200	0,3	3,6	0,2	2,6
Halogenen (^{131}J) (schildklierdosis)	0,02	0,005	1	4,1	0,25	1
Aerosolen	0,04	0,003	0,002	1,3	0,0015	0,1
Tritium	0,5	≅ 10	0,00005	0,05	0,001	1
Lozing via koelwater						
Alle nucliden exclusief tritium	2,6	0,9	–	0,6	–	0,2
Tritium	5	≅ 10	–	0,1	–	0,2

werd de centrale Dodewaard reeds voorzien van beperkte opslag- en verwerkingsfaciliteiten. Toen na Borssele volgende centrales op zich lieten wachten werd besloten tot uitbreiding van de eigen faciliteiten.

Sinds het einde van 1978 is een afvalbehandelingssysteem in werking dat internationale aandacht heeft gekregen. Het omvat een opslag en een verwerkingsinstallatie van vloeibaar afval. (Voor de goede orde: het gaat hier niet om het kernsplijtingsafval, dat in de bestraalde splijtstofelementen zit en daarin wordt afgevoerd naar de speciaal hiervoor gebouwde opwerkingsfabrieken, maar om in de centrale bij het bedrijf ontstaan afval met veel lagere specifieke radioactiviteit.) Eventueel is langdurige opslag van vloeibaar afval (filtermedium en harsen) mogelijk, zonder manipulaties en onderhoud, in opslagtanks. Vanuit de opslagtanks wordt het afval verwerkt en met cement geconditioneerd tot vast, vervoerbaar afval.

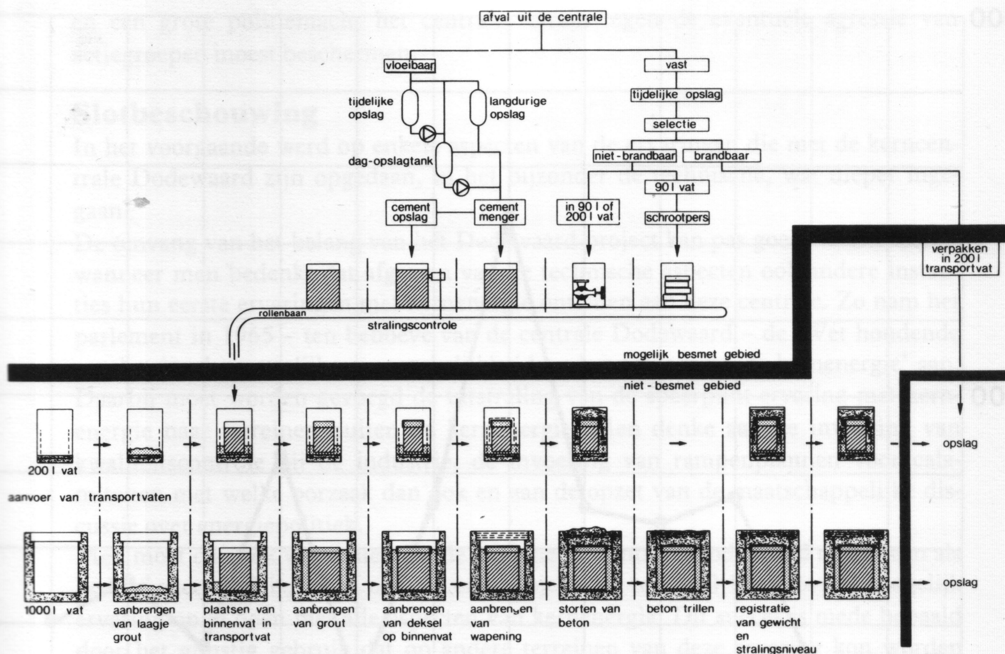
Afhankelijk van de toegestane oppervlaktestraling op de eindverpakking wordt de benodigde specifieke activiteit samengesteld uit de beschikbare vloeibare afvalstoffen. Deze zijn voor Dodewaard, in curie per kubieke meter: indamperconcentraat ~ 1 Ci/m^3; filtermedium ~ 5 Ci/m^3 en harsen ~ 25-50 Ci/m^3.

Het te verwerken mengsel wordt in een dagvoorraadtank aangemaakt en door continue menging homogeen gehouden.

Door gebruik te maken van een gammastralingsdetector kan de activiteit van een groot aantal nucliden gelijktijdig gemeten worden. Vanuit deze tanks wordt een hoeveelheid, voldoende voor één verpakkingseenheid naar de cementmenger gedoseerd, alwaar het met cement vermengd wordt. Vervolgens wordt dit mengsel in een afvalvat (binnenvat) van 90 of 200 liter gedumpt waarin het na vierentwintig uur uitgehard is. Door middel van een controlemeting wordt de juiste dosering per vat gecontroleerd.

Na het uitharden wordt het binnenvat in een buitenvat geplaatst, aangestort en wordt het deksel geplaatst. Daarna wordt de buitenwapening aangebracht en wordt het buitenvat volgestort, verdicht, geregistreerd (stralings- en gewichtsmeting). Tenslotte wordt het naar de opslagruimte getransporteerd, vanwaar na uitharding afvoer naar elders kan plaatsvinden. Alle bovengenoemde handelingen worden met behulp van manipulatoren achter een afschermmuur met loodvensters bestuurd en gevolgd.

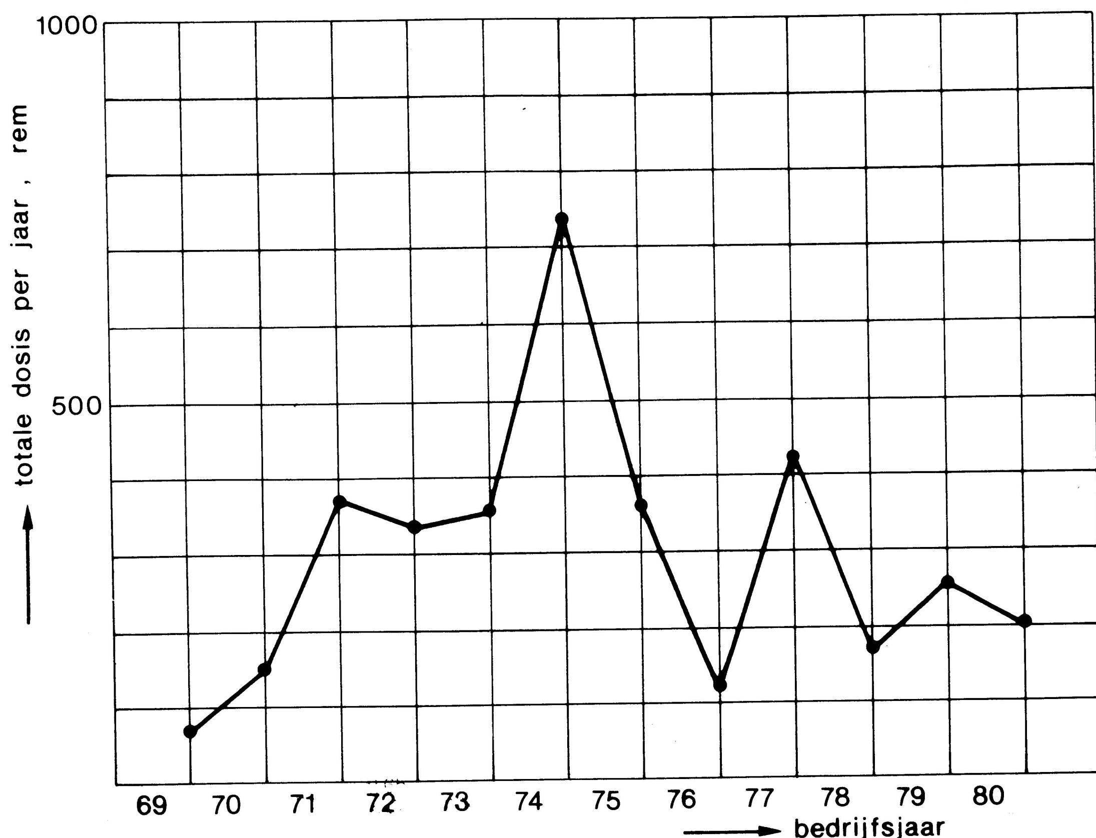
Behalve vloeibaar afval kan ook niet-vloeibaar afval geconditioneerd worden, waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen brandbaar en niet brandbaar afval. Het brandbare afval kan dan naar een verbrandingsoven afgevoerd worden. Zie figuur



Figuur 6
Schema van de afvalbehandeling in de GKN-centrale

6 voor een schema van de gebruikelijke weg die het afval aflegt.

In principe is de opzet van de organisatie van een kernenergiecentrale niet anders dan die van een conventionele centrale. Er is een groep voor de bedrijfsvoering en een groep voor het onderhoud; daarnaast zijn er de groepen voor speciale technische steun en de verzorgingsgroepen. Specifiek kan wel worden genoemd de grote aandacht die aan stralings- en aan reactorveiligheid wordt gegeven en de wijze waarop dit is georganiseerd.
Een ander specifiek aspect van een organisatie met slechts één kernenergiecentrale in beheer ligt in de omstandigheid dat veel werk geconcentreerd moet worden in een klein gedeelte van het jaar, namelijk in de bedrijfsonderbreking voor splijtstofwisseling, onderhoud en inspectie. Dit betekent de inzet van veel personeel vanuit de industrie, dat echter intensief door eigen personeel moet worden begeleid. Een gelukkige omstandigheid is dat hierbij mede specialistisch personeel van de NV KEMA kan worden ingezet.
Een belangrijk deel van de uitbreiding van de oorspronkelijk geplande personeelsbezetting kan worden toegeschreven aan de hierboven genoemde, voor een kernenergiecentrale specifieke aspecten die meer tijd en aandacht vragen dan was voorzien: de zorg voor de veiligheid van mens en installatie en inherent hieraan de zorg die aan het onderhoud en de voorbereiding en evaluatie hiervan dient te geschieden.
Als voorbeeld van de extra zorg kunnen worden genoemd de inspanningen gericht op beperking van de stralingsbelasting voor het personeel, die te splitsen zijn in maatregelen op organisatorisch en voorzieningen op technisch gebied. Bij KEMA is personeel opgeleid dat in het bijzonder tijdens de bedrijfsonderbrekingen bij de vele te werk gestelde derden als stralingscontroleur wordt ingezet. Er is een centraal dosisregistratiesysteem opgezet. Test-opstellingen worden gebouwd om te voren de werkzaamheden te kunnen oefenen die in hogere stralingsvelden moeten worden gedaan, teneinde de tijd te bekorten. Er zijn vele technische voorzieningen getroffen die hebben geresulteerd in lagere stralingsbelastingen bij het bedrijf en



Figuur 7
Stralingsbelasting van personeel in de GKN-centrale

het onderhoud van de systemen. In de grafiek (figuur 7) waarbij de totale opgelopen stralingsdosis per jaar voor eigen en buiten-personeel tegen het bedrijfsjaar is afgezet blijkt dat tenminste een stabilisatie in de stralingsbelasting is opgetreden. Duidelijk te zien is de hoge belasting in 1974 ten gevolge van de reparaties aan de overgangsstukken en de lage belasting in 1976, toen geen splijtstofwisseling plaats vond. Door gericht onderzoek naar het ontstaan en het gedrag van de radioactiviteit (onder andere geactiveerde corrosieprodukten) wordt getracht de stralingsbelasting nog verder te doen afnemen.

Tot de opgedane ervaring moet ook gerekend worden de veranderde houding van het publiek tegenover kernenergie in het algemeen en de centrale Dodewaard in het bijzonder. Kort na het gereedkomen van de centrale en de officiële opening was er veel en positieve belangstelling, waarvoor open dagen werden georganiseerd. De algemene belangstelling zakte daarna echter snel weg. Totdat begin 1972 – na enige voorlopers vooral in de Verenigde Staten – ook in ons land heftige discussies losbarstten. Deze discussies werden nooit uit de weg gegaan, maar moeite hadden we toch wel met het gebrek aan nuancering, misleidende krantekoppen, televisie-uitzendingen over kernenergie waarin met atoombommen werd gegooid, interviews waaruit selectief werd geknipt, actiegroepen die ondanks dringende uitnodiging weigerden te komen kijken en praten, enzovoort.

Een uitvloeisel van deze controverse was helaas ook de sterk veranderde aanblik van de centrale: het terrein, oorspronkelijk omgeven door een eenvoudig koeiehek en een enkele slagboom met een vriendelijke portiersloge, wordt nu streng bewaakt door middel van dubbele hekken met prikkeldraad. En in schril contrast met de open dagen, toen honderden mensen vrijelijk over het terrein en door de centrale bewogen, staat wel de blokkade in oktober 1980, waarbij personeel was ingesloten

en een grote politiemacht het centrale terrein tegen de eventuele agressie van actiegroepen moest beschermen.

Slotbeschouwing

In het voorgaande werd op enkele aspecten van de ervaringen die met de kerncentrale Dodewaard zijn opgedaan, in het bijzonder de technische, wat dieper ingegaan.
De omvang van het belang van het Dodewaard-project kan pas goed worden beseft wanneer men bedenkt dat afgezien van de technische aspecten ook andere instanties hun eerste ervaringen met kernenergie ontlenen aan deze centrale. Zo nam het parlement in 1965 – ten behoeve van de centrale Dodewaard – de 'Wet houdende regelen inzake wettelijke aansprakelijkheid op het gebied van de kernenergie' aan. Daarbij moet worden gevoegd de uitstraling van de speerpunt-ervaring met kernenergie naar terreinen buiten de kernenergie. Men denke aan de invoering van kwaliteitscontrole bij de industrie, de invoering van rampenplannen voor calamiteiten met welke oorzaak dan ook en aan de opzet van de maatschappelijke discussie over energiepolitiek.
Men moet dan ook vaststellen dat de kernenergiecentrale Dodewaard niet alleen als bedrijf succesvol is, maar ook als een project dat ten doel heeft zoveel mogelijk ervaring op te doen met alle aspecten van kernenergie. Dit succes is mede bepaald door het gunstig gebruik dat op andere terreinen van deze ervaring kon worden gemaakt. Het is extra verheugend dat beide doelstellingen tegelijkertijd blijken te kunnen worden verwezenlijkt.
Er zij nog op gewezen dat de centrale Dodewaard, afgezien van de eigen personele bezetting, voor een groot aantal mensen in de industrie, bij KEMA en bij de overheid werkgelegenheid schept door de behoefte aan levering van materialen en diensten. Tenslotte is het van belang ervaring te blijven opdoen met alle facetten van kernenergie en mede te kunnen blijven denken en praten over die aspecten die in ontwikkeling, of nog discutabel zijn.
Deze argumenten tezamen rechtvaardigen de conclusie dat het Dodewaard-project nog zo lang mogelijk moet worden voortgezet.

Referenties

(1) J.J. Went, Fysische Aspecten van Kweekreactoren, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 30* (1964), blz. 321.
(2) Ontwerpfilosofie van de Kokendwaterreactor van de GKN-centrale te Dodewaard, *Elektrotechniek 45,* (1967), met artikelen van P. Mostert, R.M. van Kuyk, A. Tiktak, C.K. Adema, K. Wassenaar en J.P.M. Smits van Waesberghe.
(3) De 54 MWe Kernenergiecentrale te Dodewaard, *Polytechnisch Tijdschrift* (1968), met artikelen van J. den Boer en K. Wassenaar, H.M. Rooij, J. den Boer, A.F. Verzijl, W.R. van Engen, A. Vrieze, F. Geevers, C. Hubers en R.G. Vogel.
(4) Dodewaard-nummer, *De Ingenieur 82* (1970), met artikelen van S.H. Woldringh, E.P.B. Jongen, R.G. Vogel en P. Mostert.
(5) L.B. Dufour, De Kernenergiecentrale te Dodewaard. *De Ingenieur 91* (1979), blz. 611.
(6) *Risico-analyse van de Splijtstofcyclus in Nederland* (RASIN), Samenwerkende Electriciteitsproductiebedrijven (SEP) NV, Arnhem, juni 1975.

4. DE KERNENERGIECENTRALE BORSSELE

A. Tiktak

De tweede kernenergiecentrale in Nederland bevat een grote drukwaterreactor. Sinds 1973 produceerde de centrale een elektrische energie van ongeveer 25 miljard kilowattuur bij een cumulatieve beschikbaarheid van 80%. De prijs van deze energie is lager dan van conventioneel opgewekte elektrische energie, en dit voordeel wordt bij de stijgende prijzen van olie en steenkool nog steeds groter. Een beschrijving van de kernreactor en de verschillende hulpinstallaties is nodig om tot een goed beeld te komen van het reactorbedrijf en de ervaring die daarmee is opgedaan. De ervaring betreft onderhoud, veiligheidsinspectie, splijtstofwisseling, splijtstofbeheer en afvalbehandeling. Ook komen bestuurlijke problemen aan de orde. De splijtstof moet uit het buitenland worden betrokken en wordt, na gebruik, voor opwerking weer naar het buitenland verzonden. Het thans lopende contract houdt de mogelijkheid open dat het splijtingsafval, dat bij de opwerking van de splijtstof wordt afgezonderd, in de toekomst naar Nederland zal terugkeren.

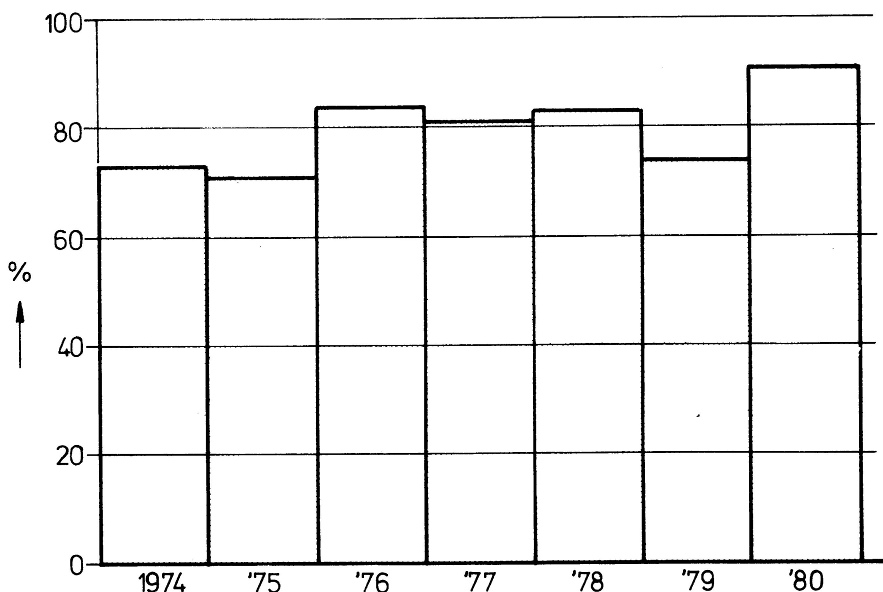
Inleiding

Nadat in 1968 de kernenergiecentrale in Dodewaard als proefcentrale van de gezamenlijke elektriciteitsproduktiebedrijven in Nederland in bedrijf was genomen, volgde op 1 april 1969 het besluit van de aandeelhouders van de NV Provinciale Zeeuwse Energie-Maatschappij (NV PZEM) over te gaan tot de bouw van een kernenergiecentrale in Borssele. Waarom werd juist deze plaats gekozen? Een antwoord op die vraag wordt gevonden in het streven van de landelijke en provinciale overheid in Zeeland te komen tot de vestiging van nieuwe industrieën. Daarvoor diende naast andere aantrekkelijke vestigingsfaktoren energie tegen een laag tarief beschikbaar te zijn. Had de overheid in de voorgaande jaren reeds goedkoop aardgas tegen een lage prijs beschikbaar gesteld aan enkele nieuwe bedrijven in Nederland, voor de mogelijke komst van het aluminiumbedrijf van Pechiney werd dit middel niet gebruikt, omdat zich reeds een soortgelijk bedrijf in Nederland bevond. Daarom werd door de NV PZEM gezocht naar een andere energiebron en zij kwam, gebruik makend van inmiddels ontvangen offertes, tot de conclusie dat een kernenergiecentrale elektriciteit kon produceren tegen een concurrerende prijs, indien een gelijkmatige hoge afname kon worden gegarandeerd, voldoende koelwater aanwezig zou zijn en de vestigingsplaats dichtbij het verbruikerscentrum zou liggen.
Het aluminiumbedrijf kon een continue afname van 300 MW garanderen. Koelwater was in de met open zee in verbinding staande Westerschelde in voldoende mate voorhanden en de vestigingsplaats voor een centrale bij Borssele lag naast het Sloegebied, waar zich het aluminiumbedrijf zou gaan vestigen.
Met de bouw van de centrale werd in juli 1969 begonnen en op 25 oktober 1973 vond de officiële overdracht door de leverancier, Kraftwerk Union AG, aan de opdrachtgever NV PZEM plaats. Sindsdien produceerde de kernenergiecentrale tot en met 31 december 1980 23,5 miljard kilowattuur (kWh).

Bedrijfsresultaten

Voor een beoordeling van de bedrijfsresultaten zijn twee criteria van belang.

1. De bedrijfstijd. Deze heeft over de periode 1974 - 1980 gemiddeld 80% bedragen. De kernenergiecentrale heeft daarmee aan de verwachtingen voldaan. Mondiaal bezien behoort hij tot de zeer goede centrales.
2. De economische resultaten. Het economische resultaat van de kernenergiecentrale wordt in zeer hoge mate bepaald door de splijtstofkosten, in vergelijking met de brandstofkosten van conventionele thermische centrales. Reeds in 1969 – dus vóór de oliecrisis van 1973/'74 – lag de kostprijs van elektriciteit uit de kernenergiecentrale lager dan die van conventioneel opgewekte elektrische energie. De in en na 1973 losgebroken golf van prijsverhogingen voor steenkool, stookolie en aardgas heeft het kostprijsvoordeel ten gunste van kernenergiecentrales verder versterkt. In de periode van 1969 tot 1980 werd de olieprijs tienmaal zo hoog, terwijl de splijtstofkosten vijf maal zo hoog werden. Was het absolute verschil in 1969 tussen olie- en splijtstofkosten ca. 0,6 cent per kWh, eind 1980 bedroeg dit ca. 9 cent per kWh. Weliswaar zijn de kapitaals- en andere vaste lasten alsmede de overige exploitatiekosten niet in de vergelijking opgenomen. Brengt men ook deze in rekening dan zou men het verschil met ca. 2 cent per kWh kunnen verminderen, zodat een netto voordeel overblijft van 7 cent per kWh. Bij een jaarproduktie van de kernenergiecentrale van 3 miljard kWh betekende dit eind 1980 op basis van alleen de brandstofkosten een voordeel van 270 miljoen gulden per jaar ten opzichte van conventioneel opgewekte elektriciteit. Rekent men ook de vaste en andere kosten mee, dan bedraagt het voordeel 210 miljoen gulden per jaar ten gunste van de kernenergiecentrale. In de splijtstofkosten en de vaste en andere kosten zijn alle bijzondere kosten, die bijvoorbeeld met verwijdering en opberging van afval samenhangen, opgenomen.
De bedrijfstijd van de kernenergiecentrale in procenten kan afgelezen worden uit figuur 1. De bedrijfstijd (in procenten) is het quotiënt van de maximaal mogelijke produktie in een jaar en de werkelijke produktie in dat jaar, maal honderd procent.



Figuur 1
Bedrijfstijd in procenten in de periode 1974-1980

Het is illustratief te zien welk aandeel de brandstofsoorten hadden in de totale elektriciteitsproduktie in de PZEM-centrales in de jaren 1974-1980. Deze produktie bedroeg ruwweg 5 miljard kWh per jaar. Tabel I geeft hiervan een overzicht.

Tabel I. Verdeling in procenten van de door de NV PZEM geproduceerde elektriciteit over de verbruikte brandstoffen in de periode 1974-1980.

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Splijtstof	57	58,4	62,8	62	66,7	58,5	73,0
Gas	38,9	37,4	30,4	35,6	21,8	15,0	4,3
Olie	3,9	3,8	6,8	2,4	11,5	26,5	22,7
Kolen	0,2	0,4	–	–	–	–	–

Het valt op dat het gasverbruik afnam ten gunste van olie en dat vooral in 1980 als gevolg van de zeer hoge bedrijfstijd van de kernenergiecentrale het aandeel van de splijstof groot was, waardoor het gas- en olieverbruik kon worden gereduceerd. In totaal werd over deze periode ca. 6 miljoen ton olie-equivalent met behulp van kernenergie bespaard.

Hoe werkt een kernenergiecentrale?

Alvorens wat dieper in te gaan op de ervaringen, die gedurende de afgelopen jaren met de kernenergiecentrale in Borssele zijn verkregen, lijkt een korte beschrijving van deze elektriciteitsfabriek en de wijze waarop hij werkt op zijn plaats. Om het de lezer wat gemakkelijker te maken gebruiken we als uitgangspunten een verklaring van en een toelichting op de werking van enkele meer bekende elektriciteitscentrales.

De eenvoudigste elektrische centrale werkt op waterkracht (figuur 2). Het langsstromende of vallende water brengt een schoepenrad, feitelijk een turbine, in beweging. De turbine-as is met de as van een generator verbonden. In de generator, die niets anders is dan een grote dynamo, ontstaat door het ronddraaien van een rotor elektrische stroom.

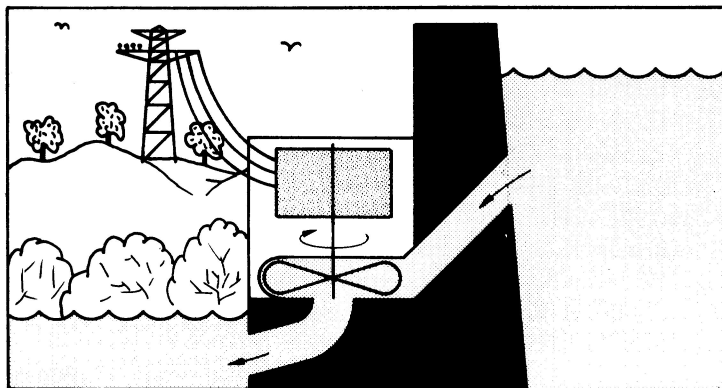
Conventionele thermische centrales (figuur 3) werken op brandstoffen, die in een stoomketel worden verstookt. De stoom drijft een turbine aan en net als bij de waterkrachtcentrale levert de aangekoppelde generator de gewenste elektriciteit. De stoom die zijn werk heeft gedaan moet echter weer tot water worden gecondenseerd. Dat gebeurt in de condensor. In deze condensor treedt het onvermijdelijke warmteverlies van dit type centrale op. Het water uit de condensor gaat terug naar de stoomketel om daar opnieuw in stoom te worden omgezet.

Een kernenergiecentrale (figuur 4) werkt ook op stoom. Het grootste deel van een kernenergiecentrale wijkt dan ook niet af van een gewone, zogenaamde conventionele centrale. Kernenergiecentrales hebben een bijzonder soort stoomketel in de vorm van een kernreactor. Er bestaan heel wat verschillende reactortypen. De hier schematisch weergegeven reactor is er één van het kokendwatertype, ofwel een BWR (*Boiling Water Reactor*). In de reactor zijn uraniumstaven geplaatst, waarin zich als gevolg van gecontroleerde kernreacties warmte ontwikkelt. Als men water langs deze staven voert, gaat dat koken. De stoom die zo ontstaat wordt gebruikt om de turbine en de generator te laten draaien.

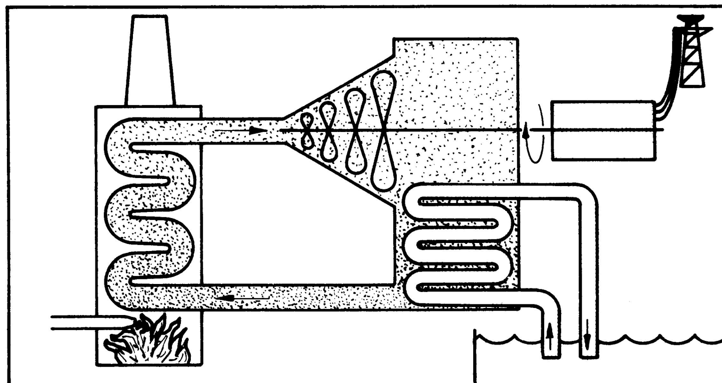
Een kernenergiecentrale met kokendwaterreactor staat in Dodewaard.

In figuur 5 is het principe weergegeven van een kernenergiecentrale met een drukwaterreactor of PWR (*Pressurized Water Reactor*), zoals er een in Borssele staat. Wij herkennen hier ook weer het pakket uraniumstaven in de reactor. Er is ten opzichte van de BWR een onderdeel aan het geheel toegevoegd, namelijk de stoomgenerator.

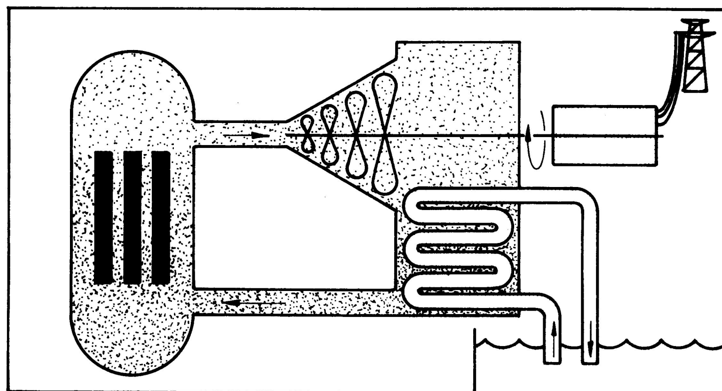
De reactor met daarin de uraniumstaven vormt tezamen met de verbindende leidingen en de stoomgenerator een aparte kringloop. Men noemt dit het primaire circuit. Het water in het primaire circuit wordt onder een hogere druk gezet dan de verzadigingsdruk, die bij de hoogst voorkomende temperatuur behoort. Daarom



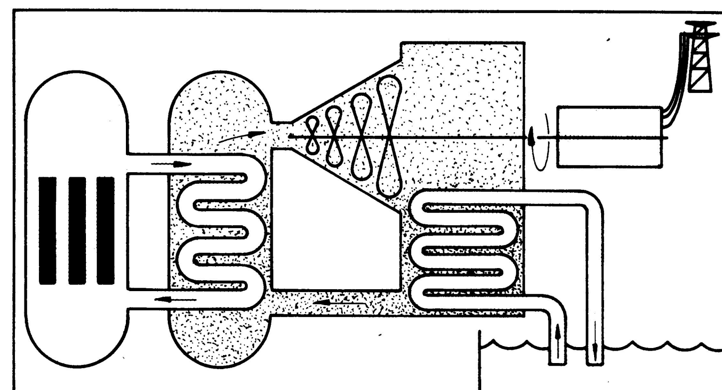
Figuur 2



Figuur 3



Figuur 4

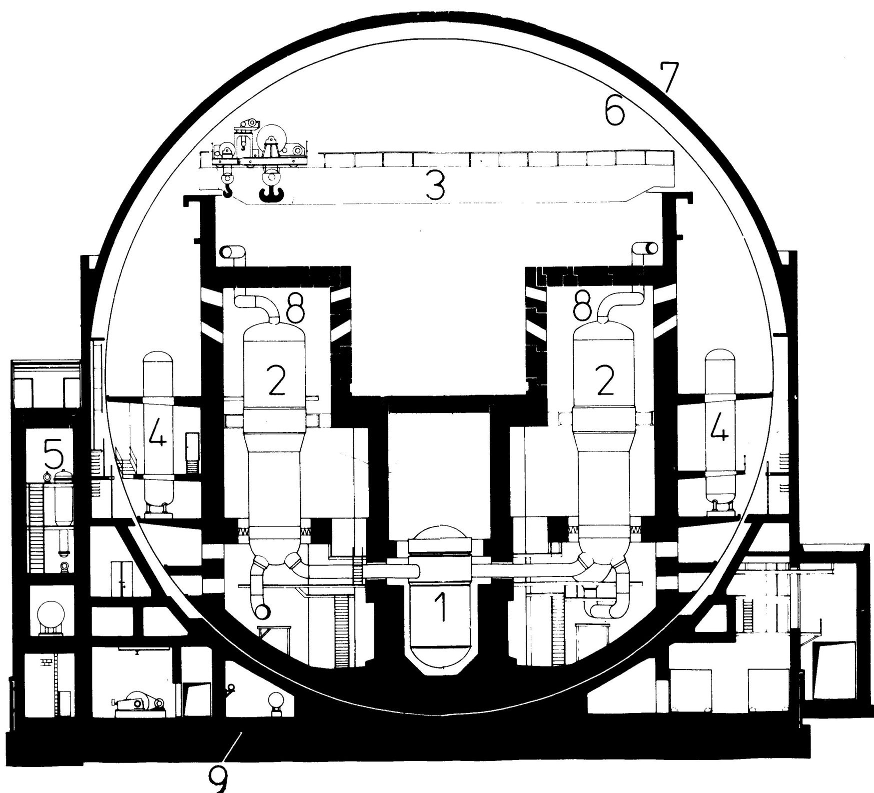


Figuur 5

gaat het water niet koken. Dit water, ook hoofdkoelmiddel genoemd, dat in de reactor in temperatuur stijgt, draagt zijn warmte in de stoomgenerator over aan een tweede water- en stoomkringloop, het secundaire circuit. In de stoomgenerator daalt de temperatuur weer. Hierin ontstaat aan de secundaire zijde wél stoom. De PWR-centrale is verder weer gelijk aan een conventionele centrale.

De kernenergiecentrale Borssele

Na deze algemene beschrijving van gewone centrales en kernenergiecentrales zullen we wat dieper ingaan op de werking van de kernenergiecentrale in Borssele.
De reactorinstallatie van deze centrale, die een bruto elektrisch vermogen heeft van 475 MW, heeft een thermisch vermogen van 1.365 MW. Hij bestaat uit een reactorvat, twee gelijke en parallel geschakelde hoofdkoelmiddelkringlopen die het primaire circuit vormen en de daarbij behorende hulp- en neveninstallaties (figuur 6).



Figuur 6
Reactorgebouw

1 **reactorvat;**
2 **stoomgenerator;**
3 **kraan;**
4 **opslagtanks voor noodkoeling;**
5 **koelmiddelontgasser;**
6 **stalen veiligheidsomhulling;**
7 **betonnen veiligheidsomhulling;**
8 **stoomleiding;**
9 **waterdichte afdichtlaag.**

Elk van de twee hoofdkoelmiddelkringlopen van het primaire circuit heeft een stoomgenerator en een reactorcirculatiepomp met de daarbij behorende leidingen. Op één van de twee kringlopen is de drukhouder aangesloten. Met dit laatste onderdeel wordt de druk boven de verzadigingsdruk gehouden en worden de bij belastingsveranderingen en storingen optredende druk- en volumeschommelingen opgevangen, zodat de druk zoveel mogelijk constant blijft.

Het primaire circuit bevat water. Het staat onder hoge druk en is radioactief. De reactorinstallatie is in een bolvormig stalen vat ondergebracht. Deze stalen veiligheidsomhulling, die een diameter heeft van 46 m, werd zodanig gekozen dat ook bij het verondersteld maximale ongeluk dat bij het ontwerp als theoretisch uitgangspunt is genomen, een ongecontroleerde ontsnapping van radioactieve splijtingsprodukten wordt voorkomen, om aldus gevaar voor de bevolking te vermijden.

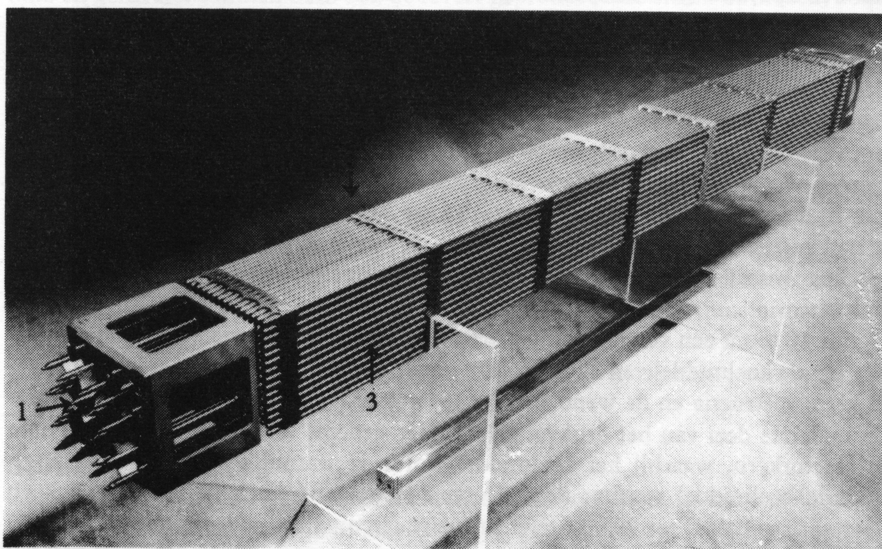
De ruimte tussen de bolvormige stalen omhulling en de buitenste omhulling van gewapend beton wordt op een iets lagere druk dan de atmosferische druk gehouden. Dit wordt bereikt met ventilatoren, die via filters de lucht afblazen, nadat deze op radioactiviteit is gecontroleerd. Zo wordt voorkomen dat radioactiviteit uit de stalen omhulling ongecontroleerd naar buiten zou kunnen dringen, als de 'bol' toch nog wat zou lekken. Op deze wijze is een dubbele veiligheid aanwezig. Voor de afvoer van ventilatielucht en de verdunning van de te lozen radioactiviteit met de buitenlucht is een schoorsteen gebouwd.

De radioactiviteit van de gassen is na het verlaten van vertragings- en stoffilters laag. Na verdunning met de ventilatielucht, zorgt de spreiding in de atmosfeer ervoor dat het stralingsniveau op de grond verwaarloosbaar klein is. De overheid heeft in de vergunning voorgeschreven tot welke grens afgifte van radioactiviteit mag plaatsvinden.

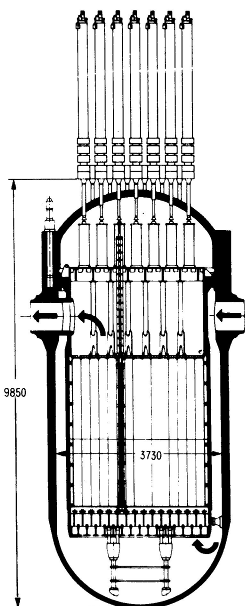
Afvalwater afkomstig van vloeren, de wasserij of uit de systemen van de centrale wordt gezuiverd, wanneer het te veel radioactiviteit bevat om zonder meer geloosd te kunnen worden. Na meting en controle mag dit gereinigde water geloosd worden door het te mengen met het naar de Westerschelde terugstromende koelwater. Ook hiervoor heeft de overheid in de vergunning vastgelegd tot welke hoeveelheid op deze wijze de afgifte van radioactieve stoffen mag plaatsvinden.

Het reactorgebouw bevat ook het splijtstofopslagbassin voor het opslaan van gebruikte splijtstofelementen, tot het moment waarop deze kunnen worden afgevoerd naar de opwerkingsfabriek.

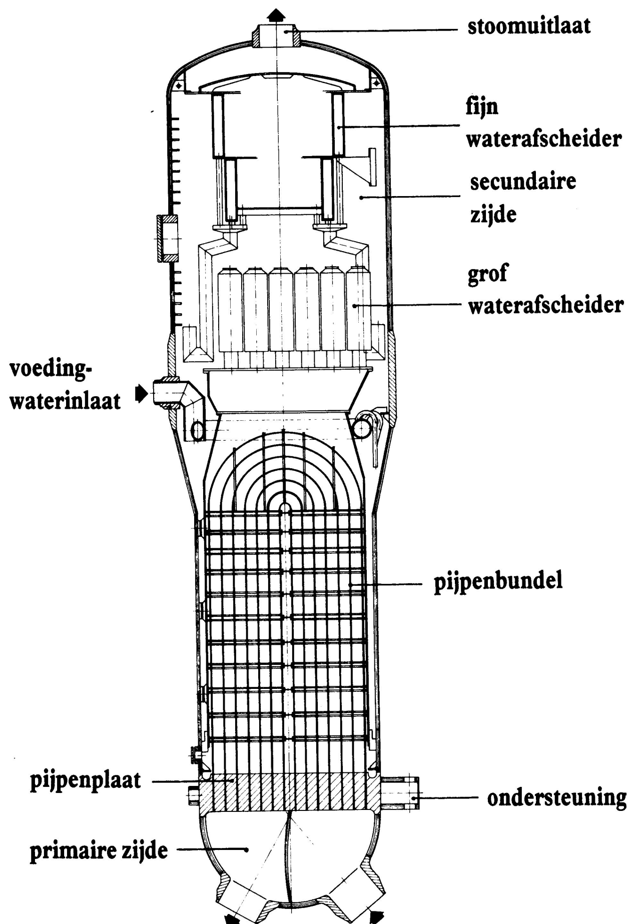
Als splijtstof wordt licht-verrijkt uranium gebruikt, dat in de vorm van keramische uraniumdioxydetabletten (UO_2) in gasdichte zircalloy-pijpen is opgesloten. Zircalloy is een legering van het metaal zirconium. 205 van dergelijke pijpen gevuld met UO_2 vormen een splijtstofelement (figuur 7). In totaal zijn er 121 splijtstofelementen in de reactor.



Figuur 7
Splijtstofelement ***1*** **regelstaaf;** ***2*** **afstandsrooster;** ***3*** **splijtstofstaaf**



Figuur 8
Reactorvat met inhoud

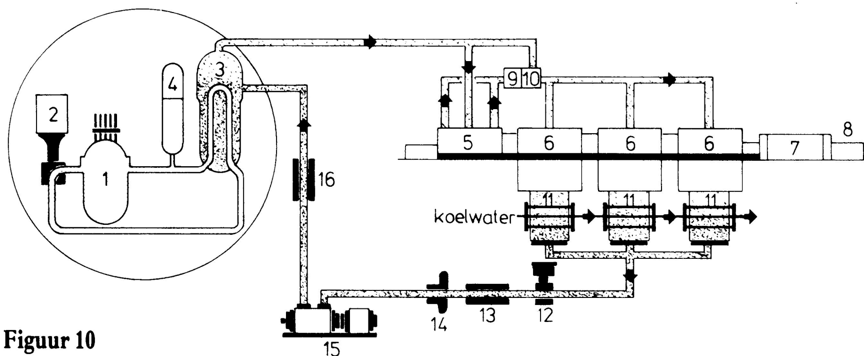


Figuur 9
Dwarsdoorsnede stoomgenerator

Het gewicht van het benodigde uranium in de kern is ca. 39 ton. De versplijting, ook wel 'opbrand' genoemd, bedraagt ca. 29.000 Megawattdagen per ton uranium. Dit komt overeen met een elektrische produktie van ca. 240 miljoen kWh. De splijtstofelementen zijn in een reactorvat (figuur 8) ondergebracht. Dit vat heeft vier aansluitingen en wel twee voor de inlaat- en twee voor de uitlaatleidingen voor het hoofdkoelmiddel.

Het reactorvermogen wordt op twee manieren geregeld, door middel van achtentwintig over de kern verdeelde beweegbare regelstaven (figuur 7) en door verandering in de concentratie van boorzuur, dat aan het koelmiddel is toegevoegd. Moet er snel geregeld worden dan wordt dit met de staven uitgevoerd, voor de langzame regeling wordt de concentratie van het neutronenabsorberende boorzuur veranderd.

Figuur 10 toont een vereenvoudigd stroomschema van de kernenergiecentrale. Het intredende koelmiddel van 295°C wordt eerst door een ringvormige spleet, die door de kernconstructie en de wand van het reactorvat (figuur 8) wordt gevormd, naar het onderste deel van het drukvat geleid. Het stroomt van onder naar boven door de reactorkern, waarbij het koelmiddel wordt verwarmd tot 320°C. Het opgewarmde koelmiddel stroomt door de twee stoomgeneratoren (figuur 9) en koelt weer af van 320°C tot 295°C. Het primaire circuit staat onder een druk van 157 atmosfeer. Aan de secundaire zijde van de stoomgenerator wordt per uur 2.662 ton verzadigde stoom van 60 atmosfeer en 274°C opgewekt.

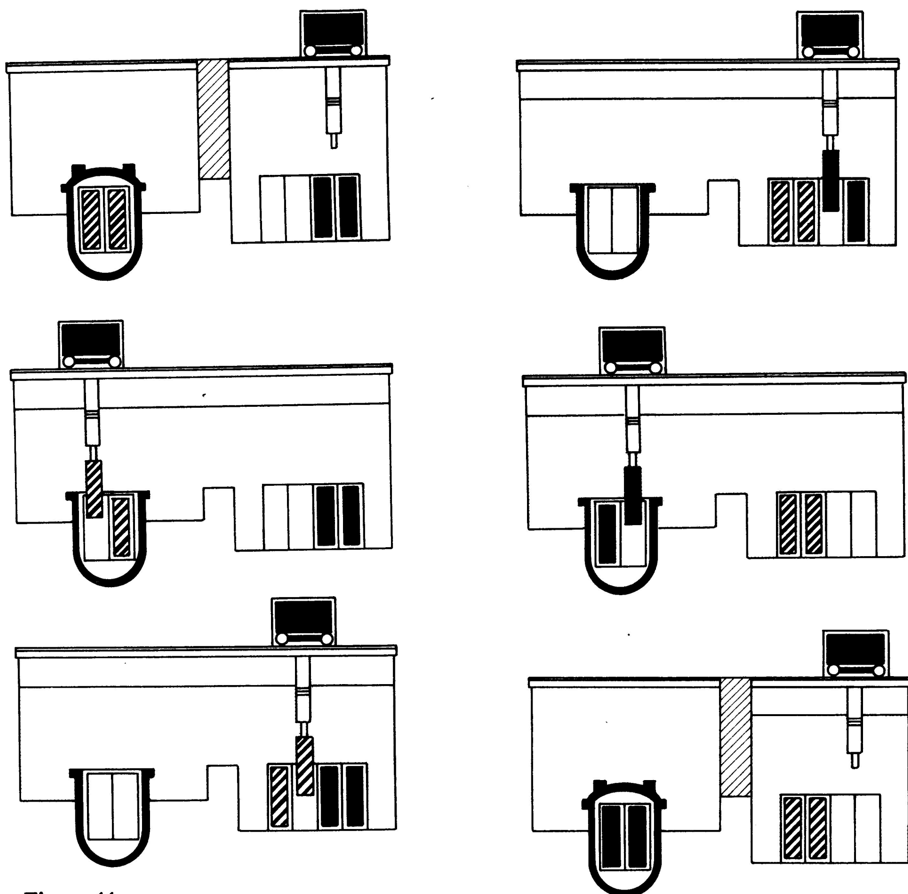


Figuur 10
Stroomschema van de kernenergiecentrale
1 **reactorvat;** *2* **reactorcirculatiepomp;** *3* **stoomgenerator;** *4* **drukhouder;** *5* **turbine, hogedrukhuis;** *6* **turbine, lagedrukhuis;** *7* **generator;** *8* **opwekker;** *9* **waterafscheider;** *10* **herverhitter;** *11* **condensor;** *12* **hoofdcondensaatpomp;** *13* **lagedruk-voorverwarmer;** *14* **voedingswaterreservoir;** *15* **hoofdvoedingswaterpomp;** *16* **hogedruk-voorwarmer.**

Omdat er in de stoomgenerator een scheidingswand is tussen het radioactieve koelmiddel en de secundaire stoom in de vorm van de pijpenbundel en pijpenplaat, wordt de stoom niet radioactief.
Alle onderdelen in het primaire circuit die met het koelmiddel in aanraking komen, bestaan uit corrosiebestendige materialen of zijn opgelast met corrosiebestendige lagen.
De elektrische stroom wordt opgewekt in een door een stoomturbine aangedreven generator, die een toerental heeft van 3.000 omwentelingen per minuut. De turbine bestaat uit vier gedeelten, één hogedrukhuis en drie lagedrukhuizen. De lagedrukhuizen staan in verbinding met de condensor. De wikkelingen van de generator worden door waterstofgas gekoeld.
Om de vochtigheid van de verzadigde stoom in de turbine te verminderen is in de overstroomleiding tussen het hoge- en lagedrukgedeelte een waterafscheider geplaatst. De herverhitting vindt plaats door condenserende verse stoom en hogedrukaftapstoom in de herverhitter.
De condensatie-installatie bestaat uit drie condensors. Bij afschakeling van de turbine en generator kunnen deze ook de teveel geproduceerde stoom opnemen, zodat de reactor niet uitgeschakeld behoeft te worden. Op deze wijze kan de centrale de elektriciteitslevering in korte tijd hervatten, als de turbine en de generator weer snel in bedrijf genomen kunnen worden. De voor de condensors benodigde hoeveelheid koelwater van 63.000 m^3 per uur komt uit de Westerschelde. De daarmee gecondenseerde stoom wordt als voedingswater teruggepompt naar de stoomgeneratoren, nadat het water eerst is verwarmd tot 216°C in zowel lage- als hogedrukvoorverwarmers, die met aftapstoom uit de turbine worden verwarmd om aldus het warmterendement van de centrale te verhogen.
Het elektrische vermogen van 475 MW, dat door de 600 MVA-generator met een spanning van 21 kV wordt opgewekt, wordt via een machine-transformator met een vermogen van 570 MVA in het 150 kV-net gebracht.
De apparatuur voor de besturing, regeling en controle van de hele centrale is in de voortdurend bemande regelzaal ondergebracht.

Splijtstofwisseling

Gemiddeld éénmaal per jaar wordt de kerncentrale voor de duur van enkele weken stilgelegd in verband met de dan noodzakelijke gedeeltelijke vervanging van splijtstofelementen in de reactor.
De eigenlijke splijtstofwisseling betreft de vervanging van een derde deel van de



Figuur 11
Splijtstofwisseling

121 splijtstofelementen in de reactor door nieuwe exemplaren. In drie jaar is dus de hele reactorlading vernieuwd. Bij de wisseling blijven de elementen onder water. Dit in verband met de koeling van de nog warmte producerende elementen en de afscherming van de straling, die zij uitzenden. De splijtstofwisseling speelt zich af tussen het opslagbassin, waarin nieuwe elementen klaar staan en het geopende reactorvat. Tussen het reactorbassin en het opslagbassin zit een sluisdeur, die tijdelijk opengaat. De tekeningen laten zien hoe een en ander in zijn werk gaat (figuur 11).
Door hun verblijf in de reactor zijn de gebruikte elementen sterk radioactief geworden, terwijl ze warmte blijven produceren. Zij moeten ongeveer een jaar afkoelen, in welke tijd de radioactiviteit en de warmte-ontwikkeling belangrijk afnemen. Dit afkoelen gebeurt in het opslagbassin. Dit heeft ook een functie als tussentijds transportdepot. Een jaar nadat zij uit de reactor zijn gekomen, gaan de gebruikte elementen naar de opwerkingsfabriek van Cogéma in Frankrijk. Het transport geschiedt in goed gesloten containers, die van een afschermende wand tegen radioactieve straling zijn voorzien en daardoor erg zwaar zijn. De vervoerders, die de containers wegbrengen, zijn in dit werk gespecialiseerd en hun materiaal moet aan overheidsvoorschriften voldoen. Voordat een transport de weg op mag, is een vergunning nodig.

Veiligheid van de kernenergiecentrale

Voor de kernenergiecentrale Borssele (KCB) is, voor zij in bedrijf kwam, een veiligheidsstudie verricht, waarvan de resultaten zijn neergelegd in het veiligheidsrap-

port, dat samen met de aanvragen voor de benodigde vergunningen werd ingediend bij de overheid. Daarin zijn de afloop en de gevolgen van storingen, die een kernenergiecentrale kunnen treffen, beschreven. Bij de constructie en bouw van de KCB is men ervan uitgegaan dat de gevolgen van mogelijke storingen door de ingebouwde veiligheidssystemen moeten kunnen worden opgevangen. Bij het ontwerp van de centrale veronderstelde men het in één keer geheel doormidden breken van de belangrijkste pijpleiding van het primaire systeem tussen de reactor en de stoomgeneratoren. Bij een dergelijke breuk spuit water, dat gedeeltelijk tot stoom overgaat, uit de reactor in het reactorgebouw, waardoor de splijtstofelementen droog kunnen komen te staan. Het ergst denkbare gevolg van dit effect is het gedeeltelijk smelten van de splijtstofelementen in de reactor.
Ofschoon bij een dergelijke pijpbreuk het kernsplijtingsproces automatisch stopt, blijft de splijtstof nog lange tijd zoveel warmte ontwikkelen dat deze in theorie door de bodem van het reactorvat zou kunnen smelten en zich zelfs een weg door de betonnen funderingen zou kunnen banen als er geen maatregelen zouden worden genomen.
De veiligheidsvoorzieningen zijn erop gemaakt zo'n catastrofe, maar ook andere die denkbaar zijn, te voorkomen. Er zijn daartoe verschillende, onafhankelijk van elkaar werkende veiligheidsvoorzieningen, waarvan het dubbel uitgevoerde noodkoelsysteem het belangrijkste is. Alle veiligheidsvoorzieningen worden op gezette tijden getest.

Voorzieningen ten behoeve van de splijtstofcyclus

Als splijtstof voor de KCB wordt licht-verrijkt uranium gebruikt. Daartoe moet jaarlijks een equivalent van ca. 80 ton natuurlijk uranium in de vorm van uraniumhexafluoride (UF_6) beschikbaar zijn. Door een verrijkingsfabriek wordt het UF_6 omgezet in ca. 13 ton tot 3,3% verrijkt uranium. Voor het leveren van dit UF_6 werden in de afgelopen jaren enkele contracten afgesloten met leveranciers uit Frankrijk en Duitsland. Het UF_6 wordt door één van de drie Amerikaanse verrijkingsfabrieken verrijkt, waarvoor in 1972 een langlopend contract met de United States Energy Reserach and Development Agency werd afgesloten.
De fabrikant van de splijtstofelementen haalt het verrijkte UF_6 af bij de verrijkingsfabriek, zet dit om in UO_2, maakt er splijtstofelementen van en levert deze af bij de kernenergiecentrale. Tot nu toe werden alle splijtstofelementen via Siemens Nederland betrokken van de Kraftwerk Union AG in Duitsland. De kwaliteitscontrole tijdens de fabricage van de splijtstofelementen wordt sinds jaar en dag in opdracht van de NV PZEM uitgevoerd door personeel van de NV KEMA te Arnhem, dat veel ervaring op dit gebied heeft.
Nadat in de reactor gedurende drie jaar energie aan de splijtstofelementen is onttrokken, worden ze ontladen en na afkoeling naar de opwerkingsfabriek van Cogéma gezonden. Reeds in 1975 werd hiervoor een opwerkingscontract met United Reprocessors gesloten, wier verplichtingen later door Cogéma werden overgenomen. Het betrof een contract voor alle splijtstofelementen, die vóór 1 januari 1980 uit de reactor zouden komen.
In de opwerkingsfabriek worden de restanten nog bruikbaar uranium, alsmede het plutonium, dat bij het splijtingsproces is gevormd, chemisch gescheiden van de splijtingsprodukten. Na het opwerkingsproces resteert een hoeveelheid kernsplijtingsafval dat zeer radioactief is. Het is dit afval waarvan men weet dat het voorgoed buiten de biosfeer moet worden gehouden.
Inmiddels zijn tot begin 1981 reeds 146 elementen uit de kernenergiecentrale Borssele volgens dit contract opgewerkt, waarna het uranium voor gebruik in de splijtstofcyclus opnieuw werd verrijkt en het plutonium werd verkocht ten behoeve van de snelle kweekreactoren in Duitsland en Frankrijk. De afvalstoffen van de splijtstofelementen, die volgens dit eerste opwerkingscontract reeds zijn of

nog zullen worden opgewerkt, komen niet terug, maar worden in Frankrijk opgeslagen. Dit in tegenstelling tot het nieuwe contract dat in 1978 met Cogéma werd aangegaan voor de elementen, die in de periode 1980-1990 uit de reactor komen. Volgens dit contract heeft Cogéma het optierecht de radioactieve afvalstoffen naar Nederland terug te brengen, indien deze afvalstoffen veilig vervoerd en opgeborgen kunnen worden. Daartoe heeft de Nederlandse regering desgevraagd tegenover de Franse regering bij overeenkomst verklaard geen wettelijke of bestuurlijke stappen te zullen nemen, die Cogéma 'verhinderen gebruik te maken van de mogelijkheid de radioactieve afvalstoffen aan de NV PZEM over te dragen en in het kader van de wettelijke regelen de gebruikmaking van deze mogelijkheid te begunstigen'. Inmiddels heeft het Nederlandse parlement een wet aangenomen die de internationale overeenkomst als bovenbedoeld van kracht doet zijn.
In Nederland dienen de voorbereidingen een aanvang te nemen om in de toekomst voorzieningen te kunnen treffen, die het mogelijk maken dat de afvalstoffen ook werkelijk zullen kunnen worden opgeslagen. Daartoe worden specificaties van het te retourneren afval opgesteld, die door de Nederlandse overheid moeten worden goedgekeurd.
Het nieuwe contract voor de opslag, opwerking en verwerking tot veilig op te bergen afval, dat de NV PZEM met Cogéma heeft gesloten, heeft betrekking op 120 ton uranium in ca. 400 splijtstofelementen, die in de periode 1980-1990 zullen moeten worden afgevoerd uit de KCB. Elektriciteitsbedrijven uit België, Duitsland, Japan, Zweden en Zwitserland sloten eenzelfde contract met Cogéma. In totaal is hiermede 6.000 ton uranium gemoeid, dat tussen 1981 en 1990 naar Cap la Hague zal worden getransporteerd om te worden opgewerkt. Cogéma bouwt hiervoor een geheel nieuwe fabriek als uitbreiding van de bestaande fabriek in Cap la Hague. Inmiddels is daar in het begin van 1981 een nieuw opslagbassin voor 2.000 ton uranium met bijbehorende ontvangststations in gebruik genomen, terwijl de bouwvergunning voor de opwerkingsfabriek zelf op 2 juni 1981 werd verleend, zodat ook hiermee kan worden begonnen.
In de afgelopen jaren hebben zich op het gebied van de voorzieningen ten behoeve van de splijtstofcyclus van de kernenergiecentrale in Borssele geen situaties voorgedaan, die tot stagnaties in het bedrijf hebben geleid. De nieuwe splijtstofelementen waren steeds tijdig beschikbaar, terwijl de gebruikte elementen konden worden afgevoerd naar de opwerkingsfabriek. Wel zal door het plaatsen van nieuwe opslagrekken in het opslagbassin die een compactere plaatsing van de splijtstofelementen mogelijk maken, de opslagcapaciteit vergroot worden, zodat eventuele tijdelijke stagnaties in het transport en een langere afkoeltijd opgevangen kunnen worden.

Technische ervaring

Het is ondoenlijk alle technische ervaring van zeven jaar bedrijf in een kort hoofdstuk weer te geven. Ik volsta er dan ook mee het belangrijkste te vermelden en een algemene conclusie te trekken.
De gunstige beschikbaarheid van de centrale – die in de hier beschouwde periode boven de 80% lag – was grotendeels een gevolg van de geringe tijd, die nodig was voor het splijtstofwisselen, de veelal gelijktijdig daarmee plaatsvindende inspecties en de geplande revisies van de installatie. Deze werkzaamheden vergden soms meer tijd dan was voorzien als gevolg van geconstateerde onvolkomenheden en langer durende reparaties. Zo duurde de eerste splijtstofwisselperiode in 1975 dertien weken. In 1976 waren hiermede slechts zeven weken gemoeid. In 1977, toen twee splijtstofwisselingen plaatsvonden, duurde het negeneneenhalve week. In 1978 was de centrale na viereneenhalve week weer in bedrijf, in 1979 na een vrij lange periode van negen weken, terwijl er in 1980 geen splijtstofwisseling plaatsvond.

Tijdens deze perioden vonden de in centrales noodzakelijke revisies en preventieve onderhoudswerkzaamheden plaats. Sommige onderdelen werden verbeterd, waarbij als belangrijkste de condensors moeten worden genoemd. De corrosie door het zeewater maakte het noodzakelijk te besluiten de oorspronkelijke condensors, uitgerust met cupronikkelpijpen, te vervangen door nieuwe condensors voorzien van pijpen gemaakt van titanium.
Inspecties werden uitgevoerd om mogelijke gebreken op te sporen. In het conventionele deel van de centrale gebeurde dit op de bekende normale wijze. In de reactorinstallatie dienden daarvoor speciaal ontwikkelde methodes gebruikt te worden. Het is immers vanwege de radioactieve straling niet altijd mogelijk visuele inspecties of ultrasone metingen ter plaatse door mensen te laten uitvoeren. Daarom werd er op afstand bedienbare inspectie-apparatuur ingezet, waarmee ook onder water de vereiste metingen en inspecties konden plaatsvinden. Reeds vóór de start van de centrale was inspectie-apparatuur voor het reactorvat besteld, die naderhand werd verbeterd en uitgebreid. Momenteel vindt inspectie van de lasnaden van apparaten en leidingen grotendeels op afstand plaats en zo is het bijvoorbeeld ook mogelijk lasnaden in leidingen, die op het reactorvat aansluiten, onder water vanaf de binnenzijde aan een onderzoek te onderwerpen. De KEMA te Arnhem voerde samen met buitenlandse en binnenlandse firma's inspecties uit, waarbij de NV PZEM toezicht uitoefent op het geheel. Alle inspecties en controles staan bovendien onder toezicht van de daarvoor aangewezen overheidsinstanties.
Ondanks een aantal belangrijke en noodzakelijke onderhoudswerkzaamheden en verbeteringen alsmede de vele controles en inspecties kan als algemene conclusie vastgesteld worden dat de centrale geen onoverkomelijke problemen heeft opgeleverd en dat de veiligheid, betrouwbaarheid en beschikbaarheid goed waren.

Toezicht en controle

Bij de exploitatie van een kernenergiecentrale dienen toezicht en controle op de veilige werking te worden uitgevoerd. Daarbij is het nodig dat de verantwoordelijkheden duidelijk zijn vastgelegd. Volgens de vergunning, die door de overheid is afgegeven, is de exploitant verantwoordelijk voor een veilig bedrijf. Om die verantwoordelijkheid te kunnen dragen, zijn er door de NV PZEM organisatorische en technische maatregelen getroffen, die dit mogelijk maken. Deze eigen verantwoordelijkheid staat los van die van de toezichthoudende en controlerende overheidsinstanties, die onafhankelijk van de exploitant zelf dienen na te gaan of er van een veilig bedrijf sprake is. In dit kader worden inspecties en controles ter plaatse uitgevoerd door daarmee belaste ambtenaren van o.a. de Kernfysische Dienst van de Arbeidsinspectie, de Dienst voor het Stoomwezen, de Inspectie van het Milieu en andere instanties, die een taak hebben bij het toezicht op industriële bedrijven.
De NV PZEM is bovendien verplicht aan de overheid alles te rapporteren wat met de bedrijfsveiligheid heeft te maken. Dit gebeurt in periodieke verslagen, terwijl van bijzondere voorvallen direkt melding wordt gemaakt. Inmiddels heeft de minister van Sociale Zaken een lijst van de belangrijkste voorvallen over het jaar 1980 aan de Tweede Kamer doen toekomen. Deze rapportage zal ieder jaar plaatsvinden.
Tot de organisatorische maatregelen, die de NV PZEM al voor de inbedrijfstelling van de centrale heeft getroffen, behoort de instelling van twee veiligheidscommissies, één die de bedrijfsleiding van de kernenergiecentrale adviseert en een andere, die de directie van advies dient in alle zaken, die met de veilige werking van de centrale hebben te maken. De eerste commissie bestaat uit ter zake kundige stafleden van de centrale, de tweede uit deskundigen van buiten het bedrijf.
De stralingsbescherming wordt uitgeoefend door een afzonderlijke afdeling, waarvan de chef, die los van het bedrijf staat, aan het hoofd van de centrale rapporteert en de formele bevoegdheid heeft zich direct tot externe instanties en directie te

wenden. Hij geeft aanwijzingen voor en houdt toezicht op het in radiologische zin veilig werken in de centrale en kan het werk doen onderbreken of de centrale laten stilzetten, wanneer dat zijns inziens op grond van de veiligheid voor het personeel of omgeving noodzakelijk is. Hij controleert bovendien de lozingen van radioactieve stoffen. Ook hier hebben de overheidsinstanties hun eigen taak en oefenen zij toezicht en controle uit op het functioneren van de stralingscontroledienst van de NV PZEM. Voor de gezondheidsbescherming is de NV PZEM aangesloten bij een goed geoutilleerde bedrijfsgeneeskundige dienst, die de periodieke keuringen van de radiologische werkers uitvoert en verder met alle bedrijfsgeneeskundige taken voor het bedrijf is belast.

De personeelsbezetting

In de loop der jaren is de oorspronkelijke personeelsbezetting toegenomen van ca. 140 tot ca. 225 personen. Dit aantal wordt vooral tijdens de splijtstofwissel- en revisieperiode aangevuld met enkele honderden werkers van bedrijven, die in opdracht werkzaamheden op de centrale uitvoeren.
De verhoging van het aantal personeelsleden is vooral noodzakelijk geweest door de in omvang toegenomen onderhoudswerkzaamheden. In de afgelopen jaren is gebleken dat met name in de werktuigkundige onderhoudssfeer het begeleiden van werkers van buiten veel aandacht en mankracht vraagt.
Bovendien werden de bewakingsdienst, de stralingscontroledienst en de chemieafdeling uitgebreid. Om de stilstand zo kort mogelijk te houden, wordt gedurende zo'n periode ook het onderhoudswerk meestal in continudienst uitgevoerd. Daarvoor zijn veel mensen nodig. Een steeds betere werkvoorbereiding en planning zorgen ervoor dat de ingezette mankracht zo optimaal mogelijk plaatsvindt. Daarbij dient ten opzichte van het werken in een conventionele centrale als extra dimensie de stralingsbescherming betrokken te worden. Als richtlijn geldt dat de te ontvangen, onvermijdelijke stralingsdosis zo laag als praktisch mogelijk is moet zijn en dat deze vanzelfsprekend de voorgeschreven norm niet mag overschrijden. In tabel II is een overzicht gegeven van de stralingsdoses.
Gelukkig is er een gering verloop geweest onder het personeel. Dat heeft ertoe bijgedragen dat de verkregen ervaring een gunstig effect had op de uitvoering van de werkzaamheden. Ook de afwezigheid wegens ziekte was niet hoog. Het ziekteverzuim was gelijk aan dat van het gehele bedrijf van de NV PZEM en bedroeg ca. 6%, een cijfer dat onder het landelijk gemiddelde ligt.

Stralingsbelasting van personen werkzaam in de kernenergiecentrale

In tabel II zijn de gegevens opgenomen betreffende de stralingsdoses, die werden opgelopen door al diegenen, die van 1974-1980 in de centrale in het gecontroleerde gebied werkten. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen het eigen personeel en personeel van derden.

Tabel II. Stralingsdoses van alle personen, die op de centrale binnen het gecontroleerde gebied werkten van 1974-1980.

	aantal personen	totale dosis in rem	gemiddelde dosis per persoon in mrem
1974*	604	114	188
1975	806	548	680
1976	784	471	600
1977**	956	553	580
1978	424	182	430
1979	655	367	560
1980*	269	48	180

*: geen splijtstofwisseling **: twee splijtstofwisselingen

De verdeling van de doses over een aantal categorieën wordt in tabel III weergegeven.

Tabel III. Percentage van het totale aantal personen, waarvan de dosis lag in de desbetreffende categorie.

	1975	1976	1977	1978	1979	1980
1-500 mrem	58,3	60,2	71,0	} 83,9	57,0	89,2
501-1000 mrem	12,3	17,9	12,0		18,6	7,1
1001-3000 mrem	27,4	21,0	17,0	16,1	24,4	3,7
3001-4000 mrem	1,5	0,9	–	–	–	–
4001-5000 mrem	0,5	–	–	–	–	–

Lozingen van radioactieve stoffen

Volgens de bedrijfsvergunning mag in een periode van twaalf opeenvolgende maanden het volgende aan radioactieve stoffen worden geloosd:

Via de schoorsteen:
Edelgassen: 12.000 Ci
Jodium-131: 240 mCi
Overige halogenen: 1.000 mCi
Aerosolen: 1.000 mCi
Tritium: 50 Ci

Via het koelwaterkanaal (toegevoegd na de condensors):
Radioactieve stoffen: 5 Ci (gamma-activiteit)
Tritium: 750 Ci

De lozingen in de periode 1974-1980 waren steeds beneden deze waarden en kunnen afgelezen worden uit tabel IV.

Tabel IV. Lozingen 1974-1980.

jaar	via schoorsteen					via koelwater	
	edelgassen Ci	jodium-131 mCi	overige halogenen mCi	aerosolen mCi	Tritium Ci	radioactieve stoffen Ci	Tritium Ci
1974	5830	33,6	7,10	0,66	9,0	0,613	171
1975	2609	14,1	n.a.	1,83	12,0	0,100	56
1976	3897	8,3	0,25	0,13	9,0	0,850	41
1977	999	3,5	0,16	0,67	10,0	0,430	40
1978	416	0,2	n.a.	0,01	25,0	0,294	226
1979	213	n.a.	n.a.	0,12	24,5	0,296	225
1980	367	n.a.	n.a.	n.a.	16,5	0,122	169

n.a.: niet aantoonbaar.

Radioactief afval

Alhoewel de belangrijkste hoeveelheid radioactief afval in de vorm van gebruikte splijtstofelementen naar de opwerkingsfabriek gaat, ontstaat er tijdens stilstand en bedrijf ook nog ander radioactief afval. Hierin bevinden zich gebruikte schoonmaakmiddelen, kleding, residuen van ingedampt vloer-, was- en proceswater, hars

uit waterreinigingsinstallaties, gebruikte onderdelen, enzovoort. Dit afval wordt in vaten geperst of in het geval van de residuen en hars gemengd met polyethyleen en verpakt in een stalen vat dat op zijn beurt weer in een B-container van beton met een totaal volume van 1 m^3 wordt gedaan. De aldus verpakte hoeveelheden afval worden naar het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in Petten afgevoerd. Het persbare afval wordt daar nog verder samengedrukt en opnieuw in vaten verpakt, terwijl de B-containers meteen geschikt zijn voor *dumping* in zee. Samen met het overige radioactieve afval uit Nederland, afkomstig van laboratoria, ziekenhuizen en kernenergie-installaties vindt een jaarlijkse storting in zee plaats onder toezicht van de *Nuclear Energy Association,* een internationale organisatie.
In de periode 1974-1980 werden de in tabel V opgesomde hoeveelheden door de kernenergiecentrale Borssele afgevoerd. Het betreft hier een globale opgave van het afval, inclusief de verpakking en de afscherming, geschikt voor storting in zee.

Tabel V. Afgevoerde hoeveelheden radioactief afval.

	1974 t/m 1980	gemiddeld per jaar
Volume	1600 m^3	225 m^3
Gewicht	2200 ton	315 ton
Radioactiviteit	2000 Ci	285 Ci

Slotopmerkingen

Reeds eerder werd vermeld dat een gedetailleerd verslag van alle ervaringen in dit bestek niet mogelijk is. De belangrijkste onderwerpen zijn echter, zij het kort, behandeld. Gebleken is dat de kernenergiecentrale Borssele vanaf de start in alle opzichten goede resultaten heeft opgeleverd. Dit was mogelijk dankzij de toegewijde inzet van het personeel, dat gedurende de afgelopen jaren een schat aan ervaring heeft opgebouwd.

5. REACTORVEILIGHEID

P. Mostert

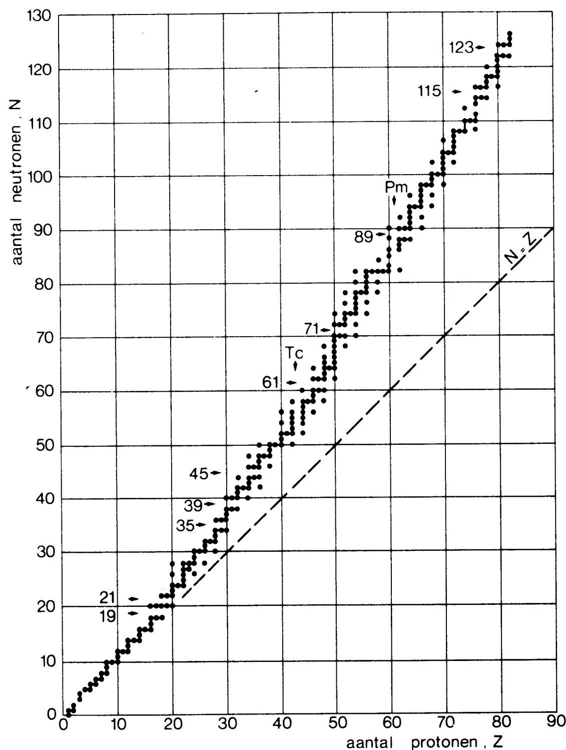
De ruime ervaring die tot nu toe met kernreactoren is opgedaan maakt duidelijk dat hun normale bedrijf geen grote problemen meer biedt. Wèl vormt het mogelijke abnormale gedrag dat tot ongelukken kan leiden een probleem. Om normaal gedrag, en daarmee de veiligheid, te verzekeren zijn kernreactoren voorzien van een groot aantal hulpsystemen, terwijl ook aan het ontwerp een serie veiligheidsoverwegingen ten grondslag liggen. Het ernstigste ongeluk is dat waarbij door onvoldoende koeling de reactorkern smelt. De radioactieve splijtingsprodukten kunnen dan de splijtstof, waarin ze zijn gevormd, verlaten en kunnen, wanneer ze bovendien door de insluitsystemen van de reactor heen weten te dringen, een ernstig gevaar voor de omwonenden betekenen. Om dit ernstigste ongeluk uit te sluiten worden speciale eisen gesteld aan de hulpsystemen voor noodkoeling en de insluiting. Daarvoor zijn risico-analyses onontbeerlijk. De op zichzelf gerechtvaardigde grote aandacht hiervoor heeft geleid tot en zekere verwaarlozing van het voorkomen van minder ernstige ongelukken, die vrij vaak kunnen optreden.

Inleiding

Iedereen die een beschrijving geeft van veiligheidsmaatregelen legt de nadruk op het gevaar. Dat geldt voor de verzekeraar, die er in de STER-reclame niet voor terugdeinst stoomboten uit een zijstraat te laten komen, dat geldt ook voor de veiligheidsingenieur in de kerntechniek. Beiden spreken over grote ongelukken met kleine kans en beiden overdrijven het risico. Als men zich dat gerealiseerd heeft kan men dit hoofdstuk rustig lezen. Men zal dan zien dat de verzekeraar weliswaar de gevolgen van grote ongelukken kan verzachten, maar dat de veiligheidstechnicus maatregelen neemt om ze te voorkomen.
In een kort hoofdstuk over reactorveiligheid moet men zich beperken. Gekozen is daarom voor een beschrijving van de gedachten die het ontwerp van een reactor beheersen in verband met de veiligheid en voor een uiteenzetting over de risico-analyse. Ook deze onderwerpen zijn echter niet volledig behandeld. Zo ontbreekt een beschrijving van de uitgebreide maatregelen tegen invloeden van buiten, zoals: aardbevingen, neerstorten van een vliegtuig, gaswolkexplosies, sabotage en oorlogshandelingen. Toch hoopt de schrijver dat mede door dit hoofdstuk het inzicht veld zal winnen, dat ook in ons land kerncentrales veilig bedreven kunnen worden.

De splijtingsprodukten

Doordat protonen elkaar onderling afstoten is het niet verwonderlijk dat de stabiele en de lang levende kernen van hoog atoomgewicht relatief meer neutronen dan protonen bevatten (zie figuur 1).
Bij splijting van de uranium- of plutoniumkernen zullen de splijtingsprodukten in eerste instantie dezelfde verhouding tussen de aantallen neutronen tot protonen vertonen en dus instabiel zijn. Ook hangt daarmee samen het feit dat reeds direct bij de splijting een aantal neutronen wordt afgestoten, waardoor weer nieuwe splijtingen kunnen worden veroorzaakt. De instabiele splijtingsprodukten zullen zich door radioactief verval via bèta-emissie bij de stabiele kernen willen voegen. In plaats van de ene radioactieve kern, bijvoorbeeld uranium-235, heeft men na de splijting dus twee radioactieve kernen gekregen, die over het algemeen echter een



Figuur 1
***N* - *Z*-diagram van atoomkernen, waarin het neutronenoverschot (*N* groter dan *Z*) voor zware kernen tot uitdrukking komt.**

---

veel kortere halveringstijd hebben dan de oorspronkelijke zware kern. Deze kortere halveringstijd betekent wel dat de radioactiviteit sneller verdwijnt dan bij de ongespleten kernen, maar anderzijds betekent het ook een veel grotere stralingsintensiteit nù.
De grotere stralingsintensiteit van de splijtingsprodukten maakt het noodzakelijk deze buiten het leefmilieu te houden. Dit doet men met behulp van goed ontworpen barrières tegen ontsnapping, terwijl de straling wordt tegengehouden door afscherming met stralingabsorberende wanden. Van de ongeveer 500 nucliden, die ten gevolge van het splijtingsproces in de kern ontstaan, is een groot gedeelte radiotoxisch niet interessant; hun vergiftigend effect is miniem.
In tabel I is een overzicht gegeven van alle radioactieve stoffen, die bij een eventueel vrijkomen in de biosfeer van belang zijn. Bij de keuze van deze stoffen is rekening gehouden met de hoeveelheid, de halveringstijd, de soort straling en de mogelijke accumulatieprocessen in plant, dier of mens.
In deze tabel, die uitgaat van een kerncentrale van 1.000 MW(e), zijn de nucliden gebundeld tot acht groepen van stoffen die chemisch op elkaar lijken, hetgeen bij de verwijderings- en accumulatieprocessen van belang is. De grootste hoeveelheid activiteit is in de groep zeldzame aarden aanwezig; deze vormen echter oxyden met een zeer hoog smeltpunt en komen dus moeilijk vrij. Het grootste gevaar wordt gevormd door de edelgassen en de halogenen.

Door het radioactieve verval vertegenwoordigen de splijtingsprodukten tevens een zekere hoeveelheid energie (zie tabel II).

Tabel I. Radioactiviteit van belangrijke nucliden in de reactorkern van een 1.000 MW(e)-centrale.

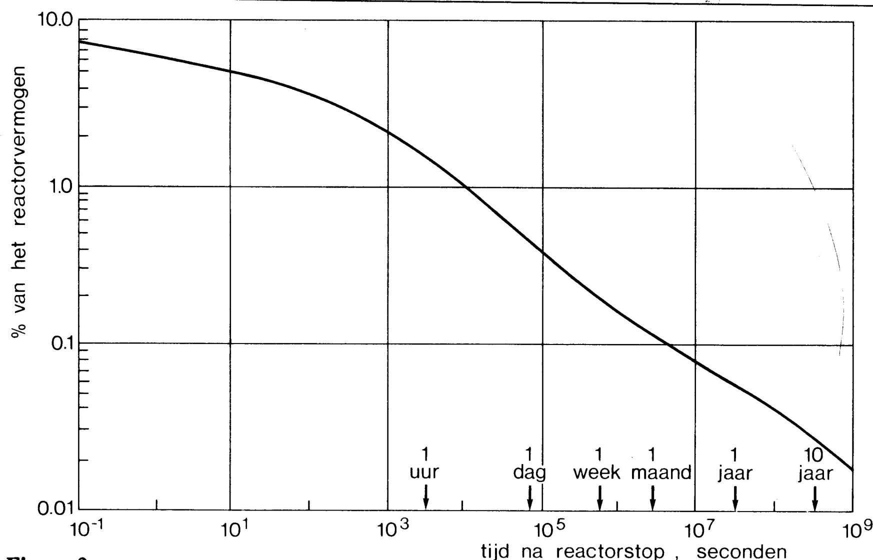
nuclide	activiteit (10^8 Ci)	halveringstijd in dagen (jaren)	activiteit (10^8 Ci)	aandeel (%)
^{85}Kr*	0,0056	3950		
^{85+}Kr	0,24	0,183		
^{87}Kr	0,47	0,0528	3,436	6,15
^{88}Kr	0,68	0,117		
^{133}Xe	1,7	5,28		
^{135}Xe	0,34	0,384		
^{131}I	0,85	8,05		
^{132}I	1,2	0,0958		
^{133}I	1,7	0,875	11,20	20,0
^{134}I	1,9	0,0366		
^{135}I	1,5	0,280		
^{86}Rb	0,37	0,187		
^{134}Cs	0,075	750	0,522	0,934
^{136}Cs	0,030	13,0		
^{137}Cs	0,047	30,17 (jaar)		
^{127}Te	0,059	0,391		
^{127}Te	0,011	109		
^{129}Te	0,31	0,0480	1,763	3,15
^{129+}Te	0,053	37,0		
^{131+}Te	0,13	1,25		
^{132}Te	1,2	3,25		
^{89}Sr	0,94	52,1		
^{90}Sr	0,037	29 (jaar)	3,677	6,58
^{91}Sr	1,1	0,403		
^{140}Ba	1,6	12,8		
^{99}Mo	1,6	2,80		
^{99+}Tc	1,4	0,25		
^{103}Ru	1,1	39,5	5,46	9,77
^{105}Ru	0,72	0,185		
^{106}Ru	0,25	366		
^{105}Rh	0,39	1,50		
^{90}Y	0,039	2,67		
^{91}Y	1,2	59,0		
^{95}Zr	1,5	65,2		
^{97}Zr	1,5	0,71		
^{95}Nb	1,5	35,0		
^{127}Sb	0,061	3,88		
^{129}Sb	0,33	0,179		
^{140}La	1,6	1,67		
^{141}Ce	1,6	32,3		
^{143}Ce	1,3	1,38	29,82	53,35
^{144}Ce	0,85	284		
^{143}Pr	1,3	13,7		
^{147}Nd	0,60	11,1		
^{239}Np	16,4	2,35		
^{238}Pu	0,00057	88 (jaar)		
^{239}Pu	0,00021	24110 (jaar)		
^{240}Pu	0,00021	6537 (jaar)		
^{241}Pu	0,034	14,7 (jaar)		
^{241}Am	0,00017	432 (jaar)		
^{242}Cm	0,0050	163		
^{244}Cm	0,00023	18,1 (jaar)		
Totaal	55,88		55,88	100,0

* Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368

Tabel II. Energieverdeling bij splijting

	MeV
kinetische energie splijtingsprodukten	166
kinetische energie van de neutronen	5
prompte gammastraling	6
bètaverval van de splijtingsprodukten	8
neutrino's	12
gamma-energie van de splijtingsprodukten	6
totaal	203 MeV

De neutrino's hebben een zeer grote vrije weglengte, zodat hun energie erg verdund vrijkomt. Dit geldt echter niet voor het bètaverval en de daaropvolgende gamma-emissie van de splijtingsprodukten. Dit laatste vermogen bedraagt ongeveer 7% van het splijtingsvermogen. Het blijft aanwezig als de reactor onderkritisch is gemaakt en neemt alleen af door radioactief verval. Na afschakelen van de reactor loopt het vermogen daardoor terug als getekend in figuur 2. Behalve voor afscherming en containment moet er dus voor afdoelde koeling gezorgd worden. De waarborging van deze drie voorzieningen is onderwerp van de reactorveiligheid.



Figuur 2
Afname van het reactorvermogen ten gevolge van nawarmte, door het radioactieve verval van splijtingsprodukten, na het uitschakelen van de reactor.

Veiligheidsoverwegingen bij het ontwerp van een centrale

De bovengenoemde noodzaak om de splijtingsprodukten ingesloten te houden, heeft ertoe geleid dat in het ontwerp een aantal achtereenvolgende barrières wordt ingebouwd, die het ontsnappen van radioactieve stoffen tegengaan.

De 'strategie' die daarbij wordt gevolgd zou men 'verdediging in de diepte' (*defense in depth*) kunnen noemen. Deze 'verdediging in de diepte' wordt gevormd door een drietal verdedigingslinies, die elk een verschillende tactiek als uitgangspunt hebben.

De eerste verdedigingslinie: *ontwerp en kwaliteitsbewaking*.

Het ontwerp en de bouw van de centrale is gericht op het voorkómen van ongelukken door hoge kwaliteit, beproefbaarheid en inspecteerbaarheid van de componen-

ten. Elk systeem dat essentieel is voor de veilige werking van de reactor wordt zo ontworpen dat het zo ongevoelig mogelijk is voor het falen van samenstellende delen (*fail-safe*).

De tweede verdedigingslinie: *beheersing van storingen.*

Ondanks de zorg bij het ontwerp, tijdens de constructie en bij het bedrijf is het mogelijk dat storingen zullen plaatsvinden. Deze storingen moeten opgespoord worden en de desbetreffende veiligheidssystemen moeten worden ingeschakeld om de storing in de hand te houden. De detectie wordt meervoudig (*redundant*) uitgevoerd op diverse manieren en met diverse parameters.

De derde verdedigingslinie: *beperking van de gevolgen.*

Mocht ondanks de bovengenoemde voorzorgen toch een ernstig ongeluk plaatsvinden, dan moet ook in deze extreem onwaarschijnlijke situatie de veiligheid van het publiek gewaarborgd worden. Hiertoe zijn additionele veiligheidssystemen aangebracht. Als ontwerpbasis van deze veiligheidssystemen wordt een reeks ongelukken gepostuleerd, waarbij aangenomen wordt dat bepaalde veiligheidssystemen zouden falen op het moment van het ongeluk. De ongeluksreeksen die voor dit doel worden uitgezocht noemt men de 'ontwerp-basis-ongelukken'.

Een aantal voorbeelden van maatregelen of systemen die een gevolg zijn van de uitgangspunten van de verschillende verdedigingslinies volgt hieronder.

De eerste verdedigingslinie:

1 De keuze van splijtstof, koelmiddel en constructiemateriaal voor de kern is zodanig dat zij tezamen stabiele en veilige eigenschappen vertonen.

2 Men maakt gebruik van constructiemateriaal waarvan de fysische eigenschappen (bijvoorbeeld sterkte en smeedbaarheid) goed bekend zijn. Dit geldt niet alleen voor de aanvankelijke onbestraalde staat, maar ook gedurende het gehele verblijf in de installatie.

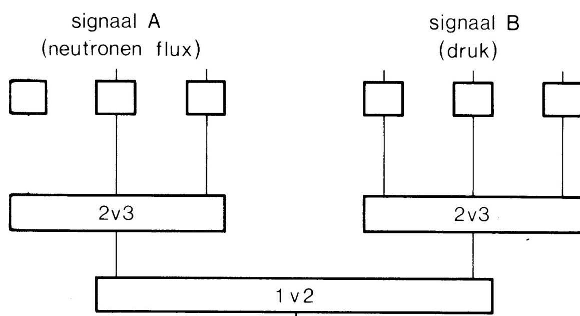
3 Veel componenten die toegepast worden in nucleaire installaties zijn gelijk aan die welke gebruikt worden in fossiel gestookte centrales, zodat een grote hoeveelheid informatie beschikbaar is over het gedrag van deze componenten.

4 De componenten worden zover mogelijk zodanig ontworpen dat continu of periodiek onderzoek naar tekenen van verandering, slijtage of het begin van falen mogelijk is.

5 De componenten worden zo geplaatst dat zij gemakkelijk toegankelijk zijn voor testen, onderhoud en reparaties.

6 De instrumenten en regelapparatuur zorgen ervoor dat de operator te allen tijde de belangrijke parameters in de centrale kent en kan regelen.

7 Voldoende redundantie en diversiteit is aanwezig in instrumenten op sleutelposities om ervoor te zorgen dat het falen van een van deze instrumenten of een bepaald type instrument er niet in resulteert dat de operator de noodzakelijke informatie niet beschikbaar heeft. Zie bijvoorbeeld de principeschets van een reactornoodstopsysteem in figuur 3.

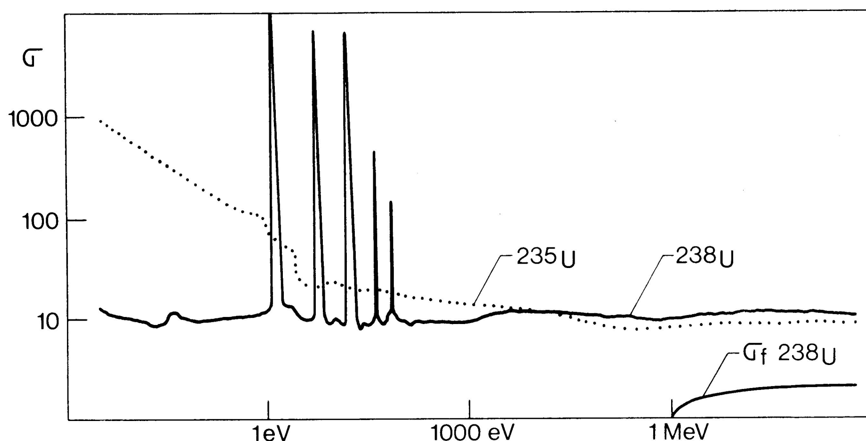


Figuur 3
Principe van een noodstopsysteem van de kernreactor; de betekenis van de aanduiding 2v3 (of 2v1) is, dat een noodstop optreedt als 2 van de 3 (of 1 van de 2) signalen duidelijk afwijkt van de normale bedrijfswaarde.

De tweede verdedigingslinie:
1 Het externe elektrische voedingssysteem wordt ondersteund door een redundant uitgevoerd elektrisch voedingssysteem op de installatie, dat onafhankelijk is van het buitennet. Dit systeem dient voor noodvoeding, teneinde de veiligheid van de installatie te waarborgen (bijvoorbeeld de pompen in bedrijf te houden) als het eigen bedrijf of de externe spanning niet beschikbaar is.
2 Een snelwerkend reactornoodstopsysteem is aanwezig met redundante en onafhankelijke instrumentatieketens, die parameters in de installatie meten. Dit systeem zorgt er voor dat het splijtingsproces, indien nodig, gestopt wordt.
3 Begrenzingen zijn aangebracht op de snelheid waarmee het vermogen kan toenemen. Dit wordt bereikt door de bewegingssnelheid van een regelstaaf te beperken en door een ongewilde uitworp daarvan uit de kern uit te sluiten.
4 Een noodkoelsysteem is aanwezig om voldoende kernkoeling te verschaffen in het geval het systeem drukloos wordt of bij verlies van koelmiddel.

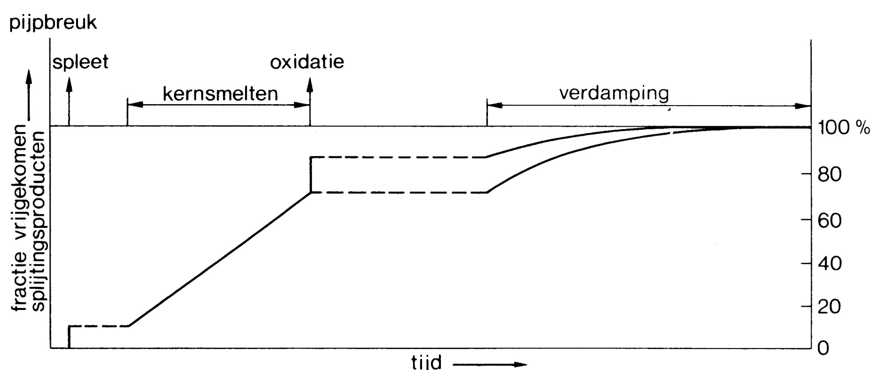
Ongelukken als basis voor het ontwerp

De belangrijke ontwerp-basis-ongelukken voor de derde verdedigingslinie van een met licht water gekoelde kernreactor zijn gebaseerd op een onevenwichtigheid tussen energieproduktie en -afvoer. Deze kan ontstaan door een ongewilde vermogensexcursie of een onvermogen om de vervalwarmte af te voeren, bijvoorbeeld door verlies van koelmiddel. De veronderstellingen dat snelle vermogenstoename of verlies van koelmiddel optreden, worden gemaakt los van de ontwerp-karakteristieken, het materiaal en de fabricage-eisen en de kwaliteitscontrole die wordt toegepast bij de bouw van de installatie. Voor met licht water gekoelde en gemodereerde reactoren is het verlies van koelmiddel één der belangrijkste ontwerp-basis-ongelukken.
In vergelijking daarmee is de snelle vermogenstoeneming (transient) zeker in lichtwaterreactoren minder belangrijk. Dit is in hoge mate te danken aan de in de eerste verdedigingslinie genoemde keuze van splijtstof en koelmiddel. Door er voor te zorgen dat de reactor ondergemodereerd is, zal bij vermogenstoename gevolgd

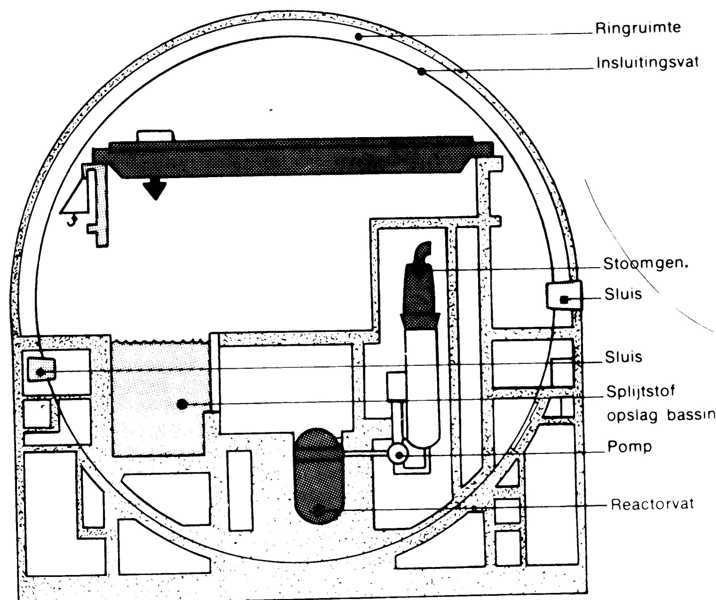


Figuur 4
Werkzame doorsnede van uranium, uitgedrukt in barn (1 barn is een oppervlak van $10^{-28}m^2$), als functie van de energie van neutronen, uitgedrukt in elektronvolt. Deze doorsnede geeft de kans weer dat een neutron door de desbetreffende uraniumkern wordt ingevangen. Bij ^{238}U treden bij enkele energiewaarden tussen 1 en 100 elektronvolt zeer grote vangstkansen op (vangstresonanties). Bij ^{235}U is de vangstkans bij lage energie zeer veel groter dan bij ^{238}U, wat tot uitdrukking brengt dat een thermisch neutron deze kern veel gemakkelijker kan splijten.

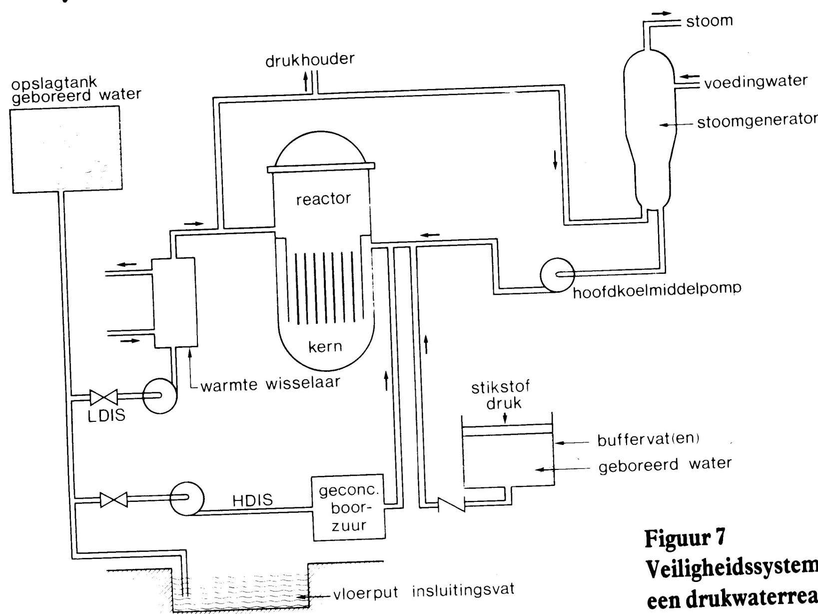
door uitzetting van de moderator een negatief reactiviteitseffect optreden: de reactor heeft een negatieve temperatuurscoëfficiënt. Door het gebruik van uraniumdioxyde als splijtstof, een slechte warmtegeleider, kan de vermogenstoename zo snel verlopen dat nog weinig warmtestroming naar de moderator kan plaatsvinden. In dat geval treedt een ander effect in werking, het zogenaamde Doppler-effect. Dit effect treedt op doordat de splijtstof laag verrijkt is en dus veel uranium-238 bevat (zie figuur 4). Door de temperatuurbeweging van de uraniumkernen worden de vangstresonanties in uranium-238 schijnbaar verbreed. De daardoor toenemende resonantievangst verlaagt weer de reactiviteit, met als gevolg een omkeren van de vermogensexcursie. In dit opzicht is de reactor dus inherent veilig.
Een dergelijke inherente veiligheid is bij een verlies van koelmiddel in mindere mate aanwezig. Een snel herstel van de koeling bij een ongeval waarbij verlies van koelmiddel optreedt is daarom uiterst belangrijk. Het vermogen zal bij zo'n ongeval altijd snel afnemen, doordat de regelstaven automatisch naar binnen bewegen. Bij een grote breuk wordt dit geassisteerd door de drukverlaging waarbij erg veel dampbellen in de kern gevormd worden, zodat de negatieve temperatuurscoëfficiënt in werking treedt. De vervalwarmte blijft echter in alle gevallen aanwezig en moet dus worden afgevoerd.
Door het verlies van koelmiddel zal de temperatuur van de bekleding van de splijtstofstaven oplopen. In eerste instantie zal de bekleding de temperatuur van de splijtstof aannemen. Daarna zal de temperatuur stijgen ten gevolge van de vervalwarmte, die nog wordt geproduceerd na de noodstop. Tenslotte zullen de noodkoelsystemen deze temperatuurstijging stoppen en de temperatuur zal vervolgens afnemen. Het is daarbij belangrijk dat de kern lang wordt gekoeld en dat een eventuele periode van droogstaan zo kort mogelijk is. Bij hogere temperatuur zou de bekleding plastisch kunnen deformeren, waardoor de doorstroming van koelmiddel tussen de staven gereduceerd wordt.
Als de noodkoelsystemen niet of slecht werken is de mogelijkheid aanwezig dat er een chemische reactie optreedt tussen het zirconium van de bekleding en de nog aanwezige stoom. Deze zirconium-waterreactie leidt tot verbrossing van de bekleding en zal tenslotte aanleiding geven tot barsten. Verder is deze chemische reactie exotherm, waardoor de splijtstofbekleding nog sneller in temperatuur zal stijgen. De bij de reactie ontwikkelde waterstof zal binnen het primaire systeem geen zuurstof aantreffen om daarmee te reageren, maar als het door de breuk naar buiten komt zal het min of meer explosief kunnen reageren met zuurstof. Bij dit barsten van de splijtstofbekleding kan een fractie van de splijtingsprodukten, die zich tussen bekleding en splijtstof bevinden, ontsnappen. In figuur 5 wordt aangegeven



Figuur 5
Schema van het vrijkomen van splijtingsprodukten bij het wegvallen van de koeling van een reactorkern.



Figuur 6
Insluitsysteem van een drukwaterreactor.



Figuur 7
Veiligheidssystemen van een drukwaterreactor.

dat deze fractie ongeveer 10% zal bedragen; ze zal hoofdzakelijk bestaan uit de edelgassen, een deel van de halogenen en zeer weinig van de andere groepen.
Als alle water uit het reactorvat verdwenen is zal de temperatuur van de splijtstof kunnen toenemen tot boven het smeltpunt van het uraniumdioxyde. De splijtingsprodukten zullen dan naar het oppervlak van de gesmolten massa gaan en daaruit ontwijken. Uit figuur 5 blijkt dat tijdens dit kernsmelten 70% van de splijtingsprodukten wordt vrijgezet.
Vervolgens wordt aangenomen dat een groot deel van de kern gesmolten is, terwijl er water onder de kern staat. Als de gesmolten massa daarin valt heeft men in andere studies aangenomen dat een stoomexplosie optreedt, waardoor het primaire

systeem en zelfs de omhulling daarvan vernield zouden worden. Nieuwe studies hebben laten zien dat de energie daartoe te klein is en dat het primaire systeem intact zal blijven. Staat er geen water onder de kern als de gesmolten massa omlaag valt, dan kan deze massa uiteindelijk door het reactorvat heen smelten en als er geen water onder het vat staat tenslotte zelfs door de bodem van het omhullingssysteem, zodat de massa in de grond komt.
Uiteraard is de veronderstelling dat er geen water onder het reactorvat zou staan absurd, aangezien we steeds hebben aangenomen dat het water uit het vat ontsnapt is. Het bovenstaande verhaal is dan ook niet gegeven om een reëel verloop van het ongeluk te schetsen. Het is veel meer een opeenstapeling van onwaarschijnlijkheden, die gebruikt wordt als uitgangspunt voor het ontwerp van veiligheidssystemen.
De importantie van een goede noodkoelvoorziening zowel voor koeling direct na de breuk als op langere termijn wordt door dit verhaal echter duidelijk onderstreept.

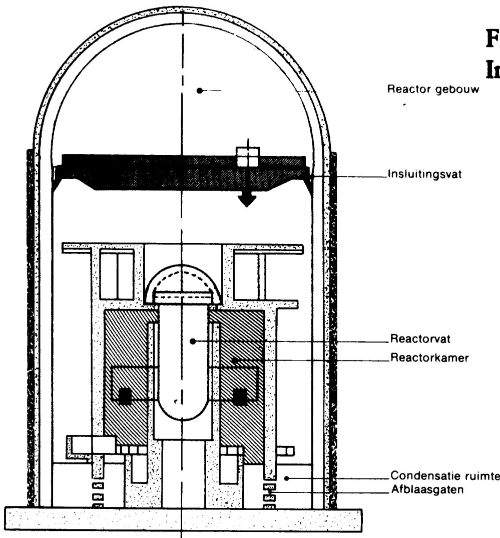
Beschrijving van de reactoren en van de veiligheidssystemen

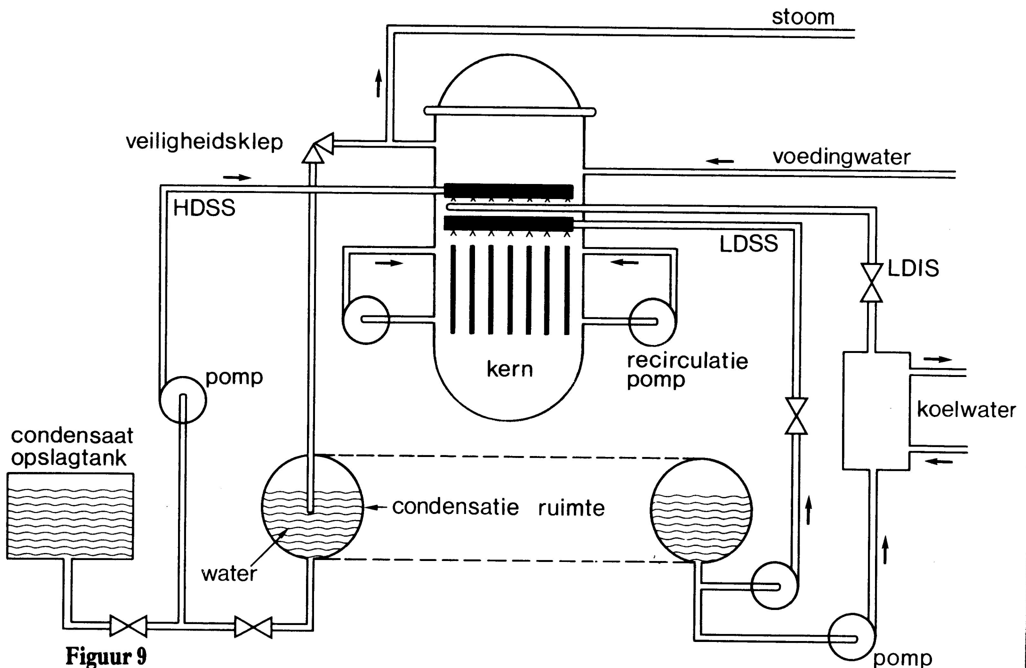
Figuur 6 geeft een beeld van het primaire systeem van een drukwaterreactor binnen de insluiting. Figuur 7 geeft een schema van de veiligheidssystemen die van belang zijn in het geval van een breuk in het primaire systeem. In figuur 8 is de kokendwaterreactor gegeven met het daarbij behorende insluitsysteem. Figuur 9 geeft de gebruikelijke noodkoelvoorzieningen bij kokendwaterreactoren.
Hoewel er geen principiële reden is aan te geven (wel een ontwerp-technische) zijn alle moderne kokendwaterreactoren voorzien van een zogenaamd nat insluitsysteem, terwijl de drukwaterreactoren alle een droog insluitsysteem hebben. Het natte insluitsysteem bestaat altijd uit minstens twee compartimenten: een droge reactorkamer en één of meer condensorruimten. De verbinding van de reactorkamer met de condensorruimte vindt plaats via pijpen met zeer grote diameter. In geval van een breuk in het primaire systeem, bijvoorbeeld een breuk van de hoofdstoomleiding, zal de stoom in de reactorkamer stromen. Via de verbindingsleiding komt de stoom in aanraking met het koude water in de condensorruimte en wordt snel gecondenseerd. Het effect is dat de druk binnen het insluitsysteem nooit sterk zal stijgen, terwijl het insluitsysteem toch relatief klein kan blijven.
Bij het droge insluitsysteem bereikt men een lage drukstijging door een zeer groot insluitsysteem rond het primaire systeem te bouwen. Dit systeem is dan zo groot dat behalve het reactorvat ook de stoomgeneratoren binnen het insluitsysteem geplaatst kunnen worden, waardoor alle componenten van het primaire circuit binnen de insluiting komen.
Bij het natte insluitsysteem is dat niet het geval, zodat bij een kokendwaterreactor alle leidingen van en naar het vat van dubbele afsluiters voorzien zijn, die in geval van een breuk in het primaire systeem automatisch dichtgaan. De lage drukstijging die men in beide gevallen bereikt is belangrijk om de lekkage van radioactiviteit naar buiten te beperken.

Risico-analyse

De hierboven beschreven ontwerp-basis-ongelukken werd, zeker in de eerste jaren van de reactortechniek, een zeer lage waarschijnlijkheid toegekend. In plaats van ontwerp-basis-ongeluk sprak men dan ook van het maximaal geloofwaardige ongeluk (*maximum credible accident*). Deze terminologie heeft nogal verwarring gewekt, omdat de grenzen van het geloofwaardige nu eenmaal bij verschillende individuen anders liggen. Om dit subjectieve element te ontgaan werd in de Verenigde Staten van Amerika in het begin van de jaren zeventig de methodiek van de risico-analyse ingevoerd, de zogenaamde Rasmussen-studie, ook wel aangeduid als WASH-1400. Deze studie kwam in augustus 1974 in de conceptvorm gereed en is

Figuur 8
Insluitsysteem van een kokendwaterreactor.





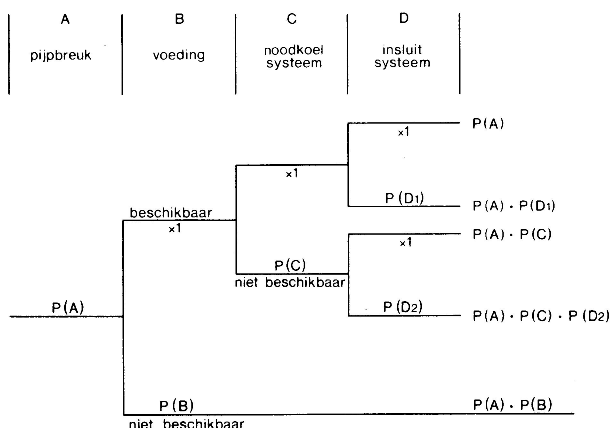
Figuur 9
Veiligheidssystemen van een kokendwaterreactor

LDIS = lage-druk-inundatiesysteem
HDSS = hoge-druk-sproeisysteem
LDSS = lage-druk-sproeisysteem

na verwerking van de kritiek in 1975 in definitieve vorm verschenen. Bij de risico-analyse wordt de kans op een bepaald ongeluk berekend, terwijl tevens de gevolgen van het ongeluk worden vastgesteld. De acceptatie van deze methodiek door de vergunning verlenende autoriteiten zal echter nog wel enige tijd op zich laten wachten. Uiteraard zou men kunnen stellen, dat ongelukken beneden een zekere waarschijnlijkheidsgrens niet meer geëvalueerd behoeven te worden, omdat zij ongeloofwaardig zijn. Als echter, bij deze kleine kans, ongelukken kunnen voorkomen met zeer ernstige gevolgen zal niemand graag de verantwoordelijkheid op zich nemen.

De vroeger wel gebruikte definitie: risico = kans × gevolg is een te sterke vereenvoudiging, die ook objectief gezien niet juist is. Bijvoorbeeld: hoewel er jaarlijks in

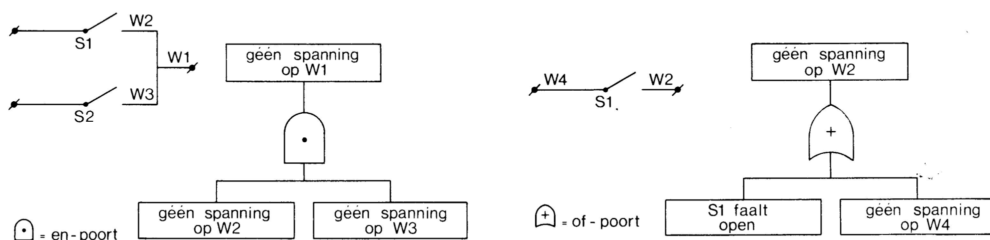
Nederland ongeveer 2.500 doden in het verkeer vallen, hetgeen als een heel ernstige zaak wordt beschouwd, wordt dit gegeven zelden – behalve door de nabestaanden – als een ramp ervaren. Zouden al deze doden echter op één dag vallen, dan was er wel sprake van een nationale ramp. Ons sociale systeem is ingesteld op 2.500 verkeersdoden verspreid over 365 dagen, maar zou volledig falen als al deze slachtoffers op één dag vielen. Verkeersopstoppingen, onvoldoende ziekenhuiscapaciteit en dergelijke zouden het gevolg zijn. Eén groot ongeluk is dus duidelijk 'erger' dan vele kleine.
Ook de vergelijking van de risico's van verschillende energiebronnen is nog steeds een moeilijke taak. Immers niet alleen het aantal acute doden, maar ook de gewonden en de eventuele verlate effecten moeten gewogen worden en voldoende nauwkeurig bekend zijn om een vergelijking mogelijk te maken. Niettemin heeft het alle zin om op de ingeslagen weg voort te gaan omdat alleen door kwantificering van het risico een goed inzicht verkregen kan worden. Mogelijk zal dit betere inzicht nog eens leiden tot algemeen geaccepteerde normen, waarmee men de verschillende energieconversiemethoden kan beoordelen.



Figuur 10
Gebeurtenissenboom voor een breuk in het primaire koelsysteem.

Bij de risico-analyse maakt men gebruik van gebeurtenissenbomen en van foutenbomen. Figuur 10 geeft een gebeurtenissenboom, waarbij de begin-gebeurtenis een grote breuk in het primaire systeem is. Iemand met een goede kennis van de installatie stelt dan een diagram op waarin de systemen, die achtereenvolgens aan bod kunnen komen, in hun onderlinge samenhang voorkomen. Zo ziet men uit het diagram, dat als een grote breuk in het primaire systeem gepaard gaat men het falen van de elektrische voeding, geen der veiligheidssystemen zal functioneren. In de figuur zijn dit de gebeurtenissen *A* en *B*, met kansen *P(A)* en *P(B)*. Als de elektrische voeding echter wel werkt kan om een andere reden de kerninundatie door het noodkoelsysteem nog falen, enzovoort. Op deze manier vindt men de combinaties van gebeurtenissen, zoals deze in de laatste kolom staan vermeld.
Soortgelijke diagrammen worden opgesteld voor een groot aantal begin-gebeurtenissen. Als verder alle systemen werken blijft de gebeurtenis beperkt tot *A*. In dat geval zullen er over het algemeen geen splijtingsprodukten vrijkomen. In vele van de andere gevallen echter wel. Al deze gevallen moeten afzonderlijk geëvalueerd worden.
Als er splijtingsprodukten buiten het primaire systeem komen, bevinden zij zich nog altijd binnen het insluitsysteem. Alleen als er lekkages of openstaande kleppen zijn zullen de splijtingsprodukten hieruit kunnen ontsnappen. Ook van deze ontsnapping van splijtingsprodukten worden gebeurtenissenbomen opgesteld.
De kans op een combinatie van gebeurtenissen is nu vast te stellen als men de kans

op een enkelvoudige gebeurtenis kent. Zo wordt de kans *P(A).P(B)* bepaald uit de kans op een breuk in het primaire *P(A)* systeem en een kans op falen van de elektrische voeding *P(B)*. De kans op gebeurtenis *A* wordt nu berekend uit de faalkans van de componenten. Zo bepaalt men de kans op een breuk in het reactorvat uit de statistisch bekende faalkans van drukvaten. Ook over stoomleidingen, veiligheidskleppen en dergelijke bestaan goede statistische gegevens.
De elektrische voeding bestaat ook weer uit een aantal systemen, die elk op zich zouden moeten falen om geen elektriciteit te hebben. De faalkans van deze systemen kan nu berekend worden omdat ook weer van elektrische leidingen, schakelaars en dergelijke goede statistische gegevens over de faalkans bekend zijn uit conventionele installaties.
Uit de mathematische bewerking van deze gegevens kan dan de faalkans van een systeem bepaald worden. Dit gebeurt in een zogenaamde foutenboom. De methodiek hiervan volgt uit het voorbeeld van figuur 11. In figuur 11a is een elektrische schakeling getekend, waarbij men in geval van nood spanning heeft op het punt W_1. De schakeling is redundant uitgevoerd. Er is dus geen spanning op W_1 als noch op W_2, noch op W_3 spanning te krijgen is. De kans dat dit het geval is vraagt



Figuur 11
Voorbeelden van een *en*- en van een *of*-poort
(a) De *en*-poort verlangt het falen van alle betrokken componenten om de topgebeurtenis te laten optreden.
(b) De *of*-poort verlangt het falen van slechts één van de betrokken componenten om de topgebeurtenis te laten optreden.

dus om de combinatie van de gebeurtenissen: géén spanning op W_2 *en* géén spanning op W_3. In dit geval moeten de kansen *vermenigvuldigd* worden. Het gebruikte symbool is een *en*-poort. Het feit dat er geen spanning op W_2 is kan veroorzaakt worden door het openblijven van schakelaar S_1 òf door het afwezig zijn van spanning op W_4. In dit geval moeten de kansen *opgeteld* worden. Het gebruikte symbool is een *of*-poort.
Uiteraard zijn de in werkelijkheid gebruikte systemen veel gecompliceerder, zodat de foutenanalyse aanleiding geeft tot vele vertakkingen: de zogenaamde foutenboom.
Met de techniek van de foutenboom kan men dus systemen analyseren waarmee nog weinig ervaring bestaat, zolang die systemen maar zijn opgebouwd uit componenten waarvan de faalkans bekend is. Door de vermenigvuldiging van kansen krijgt men nu ook voor kennis over ongevallen met zeer lage waarschijnlijkheid. Hoewel dus met grote zorgvuldigheid naar de verschillende faalmechanismen wordt gezocht is de mogelijkheid niet uitgesloten dat bepaalde niet-geïdentificeerde faalmechanismen van belang zijn. Men denke bijvoorbeeld aan ontwerpfouten, die niet opgemerkt zijn. In dat opzicht is het leerproces, waarbij men lering trekt uit incidenten bij andere centrales, van groot belang. De methode verwerpen omdat men nooit zeker is, dat men alle fouten van te voren onderkend heeft, is ech-

ter onjuist. Als men bij grote systemen alleen afgaat op wat men uit de ervaring geleerd heeft zal men heel lange tijd nodig hebben om ongelukskansen met lage waarschijnlijkheid te onderkennen, zelfs als die ongelukken grote gevolgen hebben. Als men de voorkennis over de gevolgen van kernenergie vergelijkt met de kennis die men, zonder zorgvuldige analyse, meent te hebben van andere energiebronnen maakt men dus een grote fout.

Er is nog een reden waarom de resultaten van de risico-analyse zorgvuldig behandeld dienen te worden. Hoewel men bij de kans op het ongeluk streeft naar een zo goed mogelijke benadering van de realiteit heeft men bij de berekening van de gevolgen een andere methode gebruikt. Het berekenen van de gevolgen van een ongeluk veronderstelt een zeer goede kennis van chemisch en fysisch gedrag van de splijtingsprodukten onder omstandigheden, die zeer moeilijk voor berekening toegankelijk zijn. Om toch enige berekeningen te kunnen uitvoeren, gaat men daarom uit van sterk vereenvoudigde modellen, waarbij er naar wordt gestreefd dat bij elke stap een reëel òf, als dat niet kan, een ongunstig beeld gecreëerd wordt. Op deze manier wordt voorkomen dat de uitkomsten gunstiger zouden zijn dan de werkelijkheid. Voorbeelden daarvan zijn: de snelheid waarmee het water verloren gaat bij een breuk in het primaire systeem, het gedrag van de zwevende splijtingsprodukten, aerosolen in het primaire systeem en daarbuiten, de gevolgen van een stoomexplosie. Alleen een vakman kan daardoor de berekende gevolgen op hun juiste waarde schatten. Het is daarom jammer dat juist de grote ongelukken zo'n aandacht krijgen in de publieke discussie. Immers, de kans op grote ongelukken is klein en de gevolgen zijn overdreven.

Belangrijker zijn de kleinere ongelukken met grotere kans. Denk bijvoorbeeld aan het ongeluk in de centrale te Harrisburg. De kans daarop was reeds geëvalueerd en werd geschat op éénmaal per 2.500 reactorjaren. Dat wil dus zeggen, dat als er 500 reactoren zouden zijn, éénmaal per vijf jaar ergens op de wereld een soortgelijk ongeluk zou gebeuren. Dit is uiteraard niet acceptabel. Weliswaar zijn er bij dit ongeluk geen slachtoffers gevallen, maar de angst was er wel en zal nog lange tijd een rol spelen in de besluitvorming.

Verder zijn er de grote financiële gevolgen voor het bedrijf, die vele *would be* reactorbedrijvers zal afschrikken. Het zou daarom goed zijn als de veiligheidstechnici meer aandacht zouden geven aan deze kleinere ongelukken met grotere kans. Dit is niet moeilijk, maar wel noodzakelijk als de nucleaire optie ooit iets zal moeten betekenen voor de energievoorziening van deze wereld.

Literatuur

S. Glasstone and W.H. Jordan, *Nuclear Power and its Environmental Effects,* ANS, Chicago 1980.

D. Smidt, *Reaktorsicherheitstechnik,* Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1979.

A.E. Green and A.J. Bourne, *Reliability Technology,* J. Wiley & Sons, Londen 1972.

Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants. NUREG 75/014 (WASH-1400), United States Atomic Energy Commission, oktober 1975.

Risico-analyse van de splijtstofcyclus in Nederland (RASIN). Samenwerkende Elektriciteitsproduktiebedrijven (SEP) NV, Arnhem, juni 1975.

An Approach to Quantitative Safety Goals for Nuclear Power Plants. NUREG 0739, United States Atomic Energy Commission.

M. Levenson and F. Rahn, Realistic Estimates of the Consequences of Nuclear Accidents. *Nuclear Technology,* mei 1981. (*zie hoofdstuk 19*).

Thomas H. Pigford, The Management of Nuclear Safety: A Review of TMI after Two Years, *Nuclear News,* maart 1981.

H.W. Lewis, The Safety of Fission Reactors, *Scientific American 242,* (1980) 3, blz. 53-65.

A.M. Weinberg, The Future of Nuclear Energy, *Physics Today,* maart 1981.

6. VOORRADEN EN WINNING VAN URANIUM

P.J. van der Hulst

Belangrijk voor de toepassing van kernenergie en de toekomst daarvan is de vraag hoeveel splijtstof in de natuur gevonden en gewonnen kan worden. In de praktijk gaat het dan in de eerste plaats om uranium. De verspreiding van uranium is wereldwijd, maar slechts op enkele plaatsen vindt men afzettingen met een zo hoge concentratie, dat de winning economisch verantwoord is. Aangetoonde voorraden, die te winnen zijn voor een kostprijs beneden 80 dollar per kilogram, belopen ongeveer 1,8 miljoen ton. Deze voorraden zijn voorlopig ruim voldoende om de vraag naar splijtstof te bevredigen. De mogelijke en speculatieve voorraden zijn vele malen groter, afhankelijk van de kosten die men bereid is te betalen voor de winning ervan. Men wint de uraniumertsen meestal in dagbouw, maar ook ondergronds. Het gaat steeds om ertsen met uraniumconcentraties van een paar tienden van procenten, zodat het voor de hand ligt om de winning ter plaatse te combineren met de extractie van het uranium in een ertsverwerkingsfabriek.

Uranium is de grondstof voor de splijtstof van de huidige kernenergiecentrales. Dit hoofdstuk heeft tot doel dit begin van de splijtstofcyclus te beschrijven. Hoe zijn uraniumafzettingen ontstaan, waar kunnen we ze verwachten (uraniumgeologie) en hoeveel uranium staat de mens ter beschikking (uraniumvoorraden) zijn vragen waarop zal worden ingegaan. Daarna zullen de uraniumwinning en de consequenties ervan voor het milieu nader onder de loep worden genomen.

Uraniumgeologie

Concentraties van uranium in de bodem

Uranium is een element dat in grote hoeveelheden in de buitenste lagen van de aardkorst aanwezig is. Het komt voor in uiteenlopende soorten gesteente van alle ouderdommen (van het Precambrium tot het Kwartair). De verspreiding van uranium is wereldwijd, het komt echter zelden voor in grote afzettingen met hoge concentraties.

De gemiddelde concentratie van uranium in de buitenste laag van de aardkorst bedraagt 3 à 4 gram per ton en het komt daarmee in grotere hoeveelheden voor dan goud en zilver. Gerekend over alle continenten tot een diepte van 1.000 m zou er dus een mondiale hoeveelheid uranium zijn van rond de 1.400 miljard ton. Hiervan is echter slechts een klein gedeelte voor de mens toegankelijk. Door voortdurende afzettings- en erosieprocessen is uranium ook in de zeeën terechtgekomen waarin het nu voorkomt met een concentratie van 3 milligram per m^3, hetgeen resulteert in een totale uraniumhoeveelheid in de wereldzeeën van 4 miljard ton.

Uranium reageert chemisch erg gemakkelijk en is daardoor een vrij mobiel element, dat in de natuur in meer dan 180 verschillende mineralen voorkomt. Het belangrijkste en meest voorkomende mineraal is het uraniumpekerts of *uraniumpekblende*, dat 4-waardig UO_2 en 6-waardig UO_3 bevat. Behalve pekblende zijn ook de uraniummineralen *Coffiniet* (uraniumsilikaat), *Carnotiet* (kalium-uranium-vanadium-verbinding) en *Branneriet* (uranium-titanium-ijzeroxyde) van economisch belang.

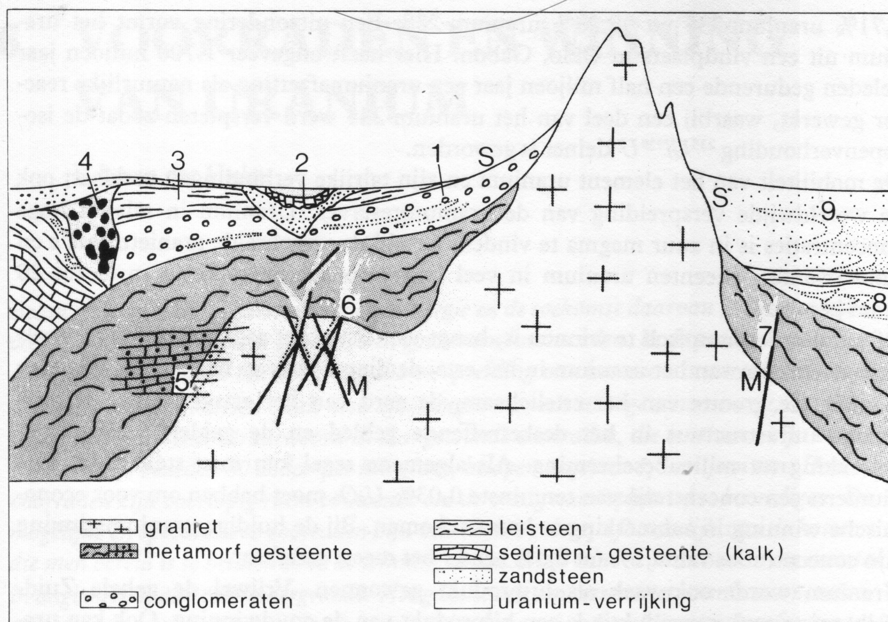
De isotopenverhouding van de beide uraniumisotopen is steeds identiek, namelijk

0,71% uranium-235 en 99,28% uranium-238. Een uitzondering vormt het uranium uit een vindplaats in Oklo, Gabon. Hier heeft ongeveer 1.700 miljoen jaar geleden gedurende een half miljoen jaar een uraniumafzetting als natuurlijke reactor gewerkt, waarbij een deel van het uranium-235 werd verspleten zodat de isotopenverhouding $^{235}U/^{238}U$ kleiner is geworden.
De mobiliteit van het element uranium en zijn talrijke verbindingen verklaart ook de wereldwijde verspreiding van de uraniumreserves. Uranium in relatief hoge concentraties is in zuur magma te vinden, terwijl de uitgebreide granietmassa's en aanverwante gesteenten uranium in veel lagere concentraties bevatten (4 tot 20 gram per ton).
Of uranium economisch te winnen is, hangt van een groot aantal factoren af, zoals de concentratie van het uranium in het erts, de diepte waarop het ertslichaam zich bevindt, de grootte van het ertslichaam, de aard van het ertsgesteente, de aanwezige infrastructuur in het desbetreffende gebied en de geldende eisen met betrekking tot milieubescherming. Als algemene regel kan men stellen dat uraniumerts een concentratie van tenminste 0,03% U_3O_8 moet hebben om voor economische winning in aanmerking te kunnen komen. Bij de huidige uraniumwinning zijn concentraties van 0,1% tot 0,5% echter het meest gangbaar.
Uranium wordt ook vaak als bijprodukt gewonnen. Vrijwel de gehele Zuidafrikaanse uraniumproduktie is een bijprodukt van de goudwinning. Ook kan uranium gewonnen worden als bijprodukt in de koperwinning en in de kunstmestfabricage uit fosfaatknollen, die door chemische neerslag in ondiepe zeeën zijn gevormd en later droog kwamen toen de bodem ging stijgen (bijvoorbeeld in het Westelijk Sahara-gebied).

Typen uraniumafzettingen (zie figuur 1)
De voornaamste uraniumreserves in de wereld kunnen op basis van hun geologische oorsprong onderverdeeld worden in twee klassen:
- afzettingen in stollingsgesteenten;
- sedimentaire afzettingen.

Uraniumafzettingen in stollingsgesteenten
Tijdens het opstijgen van het magma uit het binnenste der aarde naar het aardoppervlak vindt, afhankelijk van de mate waarin de temperatuur en druk daalt, een gefractioneerde kristallisatie plaats van verschillende mineralen. Vele elementen worden daarbij al zeer vroeg gefixeerd, terwijl andere elementen pas in een laat stadium uitkristalliseren. Uranium behoort in het algemeen tot de laatste categorie. Slechts in enkele gevallen, zoals in het ganggesteente Pegmatiet kan reeds in een vroegtijdig stadium neerslag plaatsvinden. De grootste bekende afzetting van dit type ligt bij Rössing in Namibië; ook bij Bancroft (Canada) vindt men zulke uraniumertsen. Natuurlijke reserves van dit type kunnen van minder dan 1.000 ton tot ruim 100.000 ton uranium bevatten in concentraties van 0,05 tot 0,15% U_3O_8.
Uranium kan ook neerslaan uit de laatste restanten van het nog niet geheel gestolde magma in talloze kleine en grote spleetopvullingen (hydrothermale aders). Daarbij treft men het uranium hoofdzakelijk aan in de vorm van pekblende, maar ook andere uraniummineralen komen voor. Het uraniumgehalte in deze aders is verhoudingsgewijs zeer hoog: 10 tot 15% U_3O_8 is geen zeldzaamheid. In de jaren veertig kwam bijna de gehele wereld-uraniumproduktie uit dergelijke aders. Voorbeelden van deze hydrothermale aders zijn: Jachymov (Ertsgebergte, Tsjecho-Slowakije), Port Radium (Canada) en Katanga (Zaïre). Tegenwoordig is het aandeel van deze hooggeconcentreerde uraniumertsen in de wereldproduktie nog rond 15%.

Uraniumafzettingen in sedimentair gesteente
Natuurlijke reserves van kwartsconglomeraat bevinden zich overwegend aan de



Figuur 1
Typen uraniumafzettingen
S sedimentaire afzettingen; M magmatische afzettingen
1 conglomeraten (Canada, Zuid-Afrika); 2 kalkkorst (droge delen van Australië);
3 bitumeuze schalie (Zweden); 4 spleetopvullingen (Canada, Australië);
5 contacten (Australië); 6 aders (Canada, Afrika, Ertsgebergte);
7 pegmatiten (Canada, Zuid-Afrika); 8 zandsteenlens (Verenigde Staten, Afrika, Australië);
9 erosieve zandsteen (Verenigde Staten, Australië).

rand van gebieden die sterk aan erosie blootgesteld waren in een geologische periode waarin nog weinig zuurstof in de atmosfeer was; daardoor konden alleen 4-waardige, onoplosbare uraniumverbindingen worden gevormd (pas in latere geologische perioden konden ook 6-waardige oplosbare verbindingen worden gevormd in een zuurstofrijke atmosfeer). Het onoplosbare uranium werd hoofdzakelijk door stromend water meegevoerd en het kon zich door zijn hoog soortelijk gewicht onder bepaalde omstandigheden plaatselijk concentreren, te zamen met andere zware mineralen, zoals bijvoorbeeld goud. Voorbeelden zijn: Witwatersrand (Zuid-Afrika), Blind River, Elliot Lake (Canada) en Jacobina (Brazilië).
Kwartsconglomeraatertsen behoren tot de ertsen met de laagste concentratie uranium. In Zuid-Afrika wordt het als bijprodukt van goud gedolven met gehaltes van slechts 0,01% U_3O_8. Andere afzettingen hebben uraniumgehaltes van 0,15% U_3O_8. Zij variëren in grootte van 5.000 ton tot 150.000 ton uranium.
In een volgende geologische periode (1,8 tot 1,6 miljard jaar geleden) werd het tot dan toe onoplosbare uranium voor het eerst opgelost in oppervlaktewater. Circuleerde dit oppervlaktewater door spleten in bepaalde gesteenten met een reducerend vermogen (bijvoorbeeld leisteen), dan kon het uranium in deze spleten afgezet worden. De meeste van deze ertslichamen zijn inmiddels weer verdwenen ten gevolge van erosie, maar waar andere sedimentaire lagen deze ertslichamen afdekten, konden zij blijven bestaan. Dit type ertsen komt voor in Narbalek (Australië), Rabbit Lake en Key Lake (beide in Saskatchewan, Canada).
De afmetingen van deze uraniumvoorraden variëren van 5.000 ton 200.000 ton uranium met een ertsgehalte van 0,3% tot ruim 2,5% U_3O_8.
 Toen de aarde een zuurstofrijke atmosfeer had verkregen ontstonden er uranium-

verbindingen die in water oplosbaar waren. Het uranium kon zich daardoor over grotere afstanden verplaatsen en kon daarna weer neerslaan waar absorptie of reductie van het uranium optrad. Het belangrijkste gesteente waarin dit kon gebeuren was in rivieren gevormd zandsteen. Het in een waterige oplossing verkerende 6-waardige uranium circuleerde door de soms poreuze zandsteenlagen, sloeg neer en concentreerde zich in een chemisch reducerende omgeving, bijvoorbeeld in de aanwezigheid van pyriet of organisch materiaal. Daar waar deze situatie voldoende lang voortduurde, konden uraniumafzettingen van economisch belang ontstaan. Voorbeelden van deze *zandsteenafzettingen* zijn: Grants Mineral Belt (Nieuw Mexico, Verenigde Staten), Arlit (Niger) en Lake Frome (Australië).
Het uraniumgehalte van deze zandsteenertsen varieert van 0,05% tot 0,5% U_3O_8. De grootte bedraagt maximaal 40.000 ton uranium.

Overige typen uraniumafzettingen
Tot deze groep behoren alle typen uraniumafzettingen die niet bij een van de bovengenoemde groepen kunnen worden ingedeeld. Recentelijk ontdekte uraniumafzettingen in kalkkorsten (*calcrete*) komen voor in Australië, Namibië en Somalië. Dit type is gebonden aan een droog klimaat, waar kalkkorsten door verdamping van kalkhoudend grondwater ontstonden boven geulen in granietachtig gesteente.
Verder komt uranium nog voor in *leisteen* (Chattanooga Shale, USA), *steenkool* en *fosfaatertsen*, doch slechts in geringe concentraties, hoewel de uraniumwinning uit fosfaatertsen als bijprodukt van kunstmestfabricage thans een economisch haalbare produktiemethode is. In tabel I zijn enkele concentraties weergegeven.

Tabel I. Uraniumconcentraties in diverse gesteenten, ertsen en zeewater

uranium-afzetting in	U_3O_8-gehalte (gram/ton)	geschatte hoeveelheid uranium (x miljoen ton)	geschatte winningskosten ($/kg uranium)
leisteen	60–80	5	> 260
	25–60	8	> 390
	10–25	200	> 520
graniet	4–20	1800	> 520
zeewater	0,003	4000	> 1300
fosfaten*	60–150	15	> 50
steenkool*	10–400		> 130
kopererts*	1–50		

* Mogelijk winbaar als bijprodukt.

Uraniumvoorraden in de wereld

Gegevens over uraniumvoorraden

De kennis over de grootte van de uraniumvoorraden in de wereld is nog vrij beperkt. Dit is gemakkelijk te verklaren uit het feit dat de geschiedenis van het uraniumgebruik nog jong is en bovendien de huidige wereldproduktie meer dan voldoende is om aan de vraag naar uranium te kunnen voldoen. Ook in de nabije toekomst zal er ruim voldoende uranium ter beschikking staan met de thans bekende voorraden en produktiemiddelen.
Onder deze omstandigheden zal er geen sterke stimulans ontstaan om op wereldschaal naar uranium te gaan zoeken. De exploratie van uranium (evenals die van andere delfstoffen) is duur en voorlopig behoeven nieuwe vondsten niet in produktie te worden gebracht. In dit licht moeten de cijfers worden gezien die de OESO in samenwerking met het *International Atomic Energy Agency* (IAEA) regelmatig publiceert over de uraniumvoorraden in de wereld.

Bij deze inventarisatie wordt de volgende indeling aangehouden:
Aangetoonde Voorraden (Reasonably Assured Resources)
Dit zijn de voorraden waarvan de afmetingen, concentratie en configuratie bekend zijn en van een zodanige aard dat het uranium beneden een bepaalde kostprijs gewonnen kan worden met de thans bekende mijn- en procestechnieken.
Schattingen van de grootte van de uraniumconcentratie moeten zijn gebaseerd op geologische kennis en data van monsters uit boringen.
Aangetoonde voorraden met een kostprijs beneden \$80 per kg uranium worden ook wel reserves genoemd.
Mogelijke Voorraden (Estimated Additional Resources)
Dit zijn de uraniumvoorraden die, additioneel aan de aangetoonde voorraden, verwacht mogen worden voor te zullen komen op basis van geologische indicaties, zoals: extrapolatie van reeds goed bekende afzettingen, afzettingen die wel bekend maar nog slecht onderzocht zijn en nog niet ontdekte afzettingen die echter op basis van geologische analogie met goed bekende afzettingen verwacht mogen worden wel te bestaan.
Speculatieve Voorraden (Speculative Resources)
Dit zijn de voorraden die additioneel aan de eerder genoemde voorraden verondersteld worden te bestaan op grond van geologische configuratie. De lokatie kan meestal slechts globaal worden aangegeven. De naam geeft al aan dat het bestaan en de grootte van deze afzettingen speculatief is.
In tabel II zijn de aangetoonde voorraden en de mogelijke voorraden vermeld zoals de OESO-IAEA tot 1 januari 1979 heeft geïnventariseerd.

Uit de definities van de voorraden blijkt wel dat deze cijfers sterk afhankelijk zijn van de kennis van de geologie van een bepaald gebied, de mate waarin een gebied geëxploreerd is (investeringen) en de kostprijs van het uranium.
Het zal duidelijk zijn dat in het bijzonder de eerste twee factoren niet overal op de wereld gelijk ontwikkeld zijn. Volgens de huidige stand van kennis en techniek komt de OESO tot een wereldvoorraad van rond 5 miljoen ton uranium.
Om een schatting te kunnen maken van wat de mensheid uiteindelijk aan uranium ter beschikking zou kunnen staan heeft het *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) een andere benaderingswijze gekozen om de beschikbare wereldvoorraden te schatten.
Uitgaande van het gegeven dat de Verenigde Staten een relatief goed geëxploreerd land is en (bij gebrek aan betere voorbeelden) representatief gesteld mag worden voor het gehele aardoppervlak is een wereldvoorraad berekend naar evenredigheid van de bekende Amerikaanse voorraden. Deze bedragen thans (opgave van januari 1979) 1,8 miljoen ton op een oppervlakte van 9,4 miljoen km^2. Extrapolatie van deze verhouding naar het gehele aardoppervlak levert een wereldvoorraad op van rond 24,5 miljoen ton uranium, zoals weergegeven is in tabel III, waar tevens de verdeling per continent is vermeld.

Het getal van 24,5 miljoen ton uranium komt overigens zeer goed overeen met de bovengrens van de speculatieve voorraden zoals de OESO-IAEA deze hebben vastgesteld (14,2-26,4 miljoen ton). Toch kan het getal van 24,5 miljoen ton uranium gemakkelijk ter discussie worden gesteld, maar het geeft wel enig idee welke mogelijkheden er nog zijn naast de 5 miljoen ton die op het ogenblik vaak genoemd worden als de winbare uraniumvoorraden. Opgemerkt dient verder nog te worden dat de door het IIASA genoemde voorraden nog altijd uitgaan van een maximale kostprijs van \$130 per kg uranium, terwijl voor de speculatieve voorraden, zoals die door de OESO-IAEA zijn opgegeven, geen kostprijs kan worden genoemd. De huidige wereldmarktprijzen liggen tussen de \$70 en \$110 per kg uranium.
In figuur 2 zijn de thans bekende voorraden (aangetoond plus mogelijk) in kaart

Tabel II. Uraniumvoorraden volgens de OESO-IAEA (januari 1979)

	Aangetoonde voorraden (in 1000 ton *U*)			Mogelijke voorraden (in 1000 ton *U*)		
	< $80/kg *U* RESERVES	$80-130/kg *U*	TOTAAL < $130/kg *U*	< $80/kg *U*	$80-130/kg *U*	TOTAAL < $130/kg *U*
Algeria	28	0	28	0	5,5	5,5
Argentina	23	5,1	28,1	3,8	5,3	9,1
Australia	290	9	299	47	6	53
Austria	1,8	0	1,8	0	0	0
Bolivia	-	0	0	0	0,5	0,5
Botswana	0	0,4	0,4	0	0	0
Brazil	74,2	0	74,2	90,1	0	90,1
Canada	215	20	235	370	358	728
Central African Republic	18	0	18	0	0	0
Chile	0	0	0	5,1	0	5,1
Denmark	0	27	27	0	16	16
Egypt	0	0	0	0	5	5
Finland	0	2,7	2,7	0	0,5	0,5
France	39,6	15,7	55,3	26,2	20	46,2
Gabon	37	0	37	0	0	0
Germany, Federal Republic of	4	0,5	4,5	7	0,5	7,5
India	29,8	0	29,8	0,9	22,8	23,7
Italy	0	1,2	1,2	0	2	2
Japan	7,7	0	7,7	0	0	0
Korea, Republic of	0	4,4	4,4	0	0	0
Madagascar	0	0	0	0	2	2
Mexico	6	0	6	2,4	0	2,4
Namibia	117	16	133	30	23	53
Niger	160	0	160	53	0	53
Philippines	0,3	0	0,3	0	0	0
Portugal	6,7	1,5	8,2	2,5	0	2,5
Somalia	0	6,6	6,6	0	3,4	3,4
South Africa	247	144	391	54	85	139
Spain	9,8	0	9,8	8,5	0	8,5
Sweden	0	301	301	0	3	3
Turkey	2,4	1,5	3,9	0	0	0
United Kingdom	0	0	0	0	7,4	7,4
United States of America	531	177	708	773	385	1.158
Yugoslavia	4,5	2	6,5	5	15,5	20,5
Zaïre	1,8	0	1,8	1,7	0	1,7
Totaal (afgerond)	1.850	740	2.590	1.480	970	2.450

- minder dan 100 ton *U*

gebracht, waarbij onmiddellijk de grote verspreiding van deze afzettingen opvalt. Lang niet al deze voorraden zijn ook werkelijk in produktie gebracht, daar de kostprijs vaak boven de huidige wereldmarktprijs ligt. Daarmee hangt ook het feit samen dat de huidige wereldproduktie reeds meer dan voldoende is om de vraag naar uranium te dekken. Over de grootte van de bekende voorraden in de Sovjet-Unie, Oost-Europa en China zijn weinig gegevens bekend.

De landen met de grootste reserves (kostprijs beneden $80 per kg *U*) zijn de VS met 531.000 ton, Zuid-Afrika met 247.000 ton, Australië met 290.000 ton, Namibië met 117.000 ton, Canada met 215.000 ton en Niger met 160.000 ton uranium. Ongeveer 70% van de voorraden van West-Europa bevinden zich in aluin-leisteenformaties nabij Ranstad in Zweden. Er is echter besloten deze voorraden voorlopig niet in produktie te nemen. De voorraden in Frankrijk worden momenteel wel geëxploiteerd.

Van de totale aangetoonde en mogelijke voorraden in de wereld ligt bijna 60% in Noord-Amerika, dat wil zeggen binnen een gebied dat ± 17% van het oppervlak van de Westerse landen bedraagt. Ook hieruit blijkt dat in de VS de exploratie van uranium al langere tijd en veel intensiever ter hand is genomen dan op andere plaatsen in de wereld.

Tabel III. Schatting wereldvoorraden uranium

Wereldregionen	Oppervlak (miljoen km²)	OESO-NEA/IAEA schatting (10 miljoen ton)	IIASA** schatting (10 miljoen ton)
I Noord-Amerika	21,5	2,53	3,87
II Sovjet-Unie en Oost-Europa	23,5	—	4,23
III West-Europa, Japan, Australië, Nieuw-Zeeland, Zuid-Afrika, Israël	15,5	1,26	2,79
IV Latijns-Amerika	20,6	0,08	3,71
V Afrika en Zuid- en Zuid-Oost-Azië	33,6	0,33	6,05
VI Midden-Oosten en Noord-Afrika	9,8	0,08	1,76
VII China en Centraal Geplande Aziatische Economieën.	11,5	-	2,07
Wereldtotaal	136	4,29 (14,2-26,4)*	24,48

* Inclusief speculatieve voorraden
** *Energy in a finite world*
Report by the Energy Systems Program Group of IIASA
Ballinger Publishing Company, Cambridge, USA, 1981

Uraniumproduktie

Slechts een achttal landen heeft thans een uraniumproduktie van enige omvang. Daarnaast is er een toenemend aantal landen dat op het ogenblik een geringe produktie op proeffabriekschaal heeft, maar dat wellicht in de toekomst zichzelf geheel of gedeeltelijk van uranium zal kunnen voorzien, zoals bijvoorbeeld Argentinië, Brazilië, India, Mexico, Portugal, Joegoslavië en Spanje. De produktiecijfers van een aantal landen staan vermeld in Tabel IV. In het hierna volgende gedeelte zullen de voornaamste uraniumproducerende landen de revue passeren.

Verenigde Staten

De VS tellen een zeer groot aantal ondernemingen die zich met de uraniumwinnig bezighouden. Het land is goed doorzocht op uranium en nog steeds worden jaarlijks grote bedragen besteed aan de uraniumexploratie. In 1979 bedroeg het totaal door regering en industrie geïnvesteerde bedrag ten behoeve van de uraniumexploratie ruim 400 miljoen dollar. De bekende voorraden zijn dan ook groter dan in enig ander land.

Er zijn nu meer dan twintig produktiecentra in de Verenigde Staten (zie tabel V), bestaande uit één of meer ondergrondse mijnen of dagbouw-mijnen met een bijbehorende ertsverwerkingsfabriek. Deze bevinden zich vooral in de Midden-Westenstaten Nieuw-Mexico, Utah, Wyoming en Colorado. In Florida en Louisiana wordt als bijprodukt van de kunstmestindustrie uranium uit fosforzuur gewonnen. Hiervan zijn op dit moment vier fabrieken in bedrijf. In Texas wordt op een aantal plaatsen uranium gewonnen door het direct in de bodem in oplossing te brengen door injectie van zwavelzuur (*solution mining*). Een andere techniek die wordt toegepast is dat uraniumerts op een grote hoop wordt gestort, waarna het uranium gedurende lange tijd uitgeloogd wordt.



Figuur 2
Verspreiding van uraniumafzettingen.

No.	Locatie	No.	Locatie	No.	Locatie
	Eurazië				
1	Pleutajokk Noord-Zweden	9	Ertsgebergte Tsjecho-Slowakije	17	Sutschan bekken Sovjet Unie
2	Ostersund Centraal-Zweden	10	Irkoetsk Sovjet Unie	18	Kantschatka Sovjet Unie
3	Ranstad Zuid-Zweden	11	Angara-gebied Sovjet Unie	19	Singbum district India
4	Alto Alentejo, Guarda, Urgeirica Portugal	12	Tunguska-gebied Sovjet Unie	20	Madras, Palghat India
		13	Norilsk Sovjet Unie	21	Matara Srilanka
5	Mazarete Spanje	14	Tuja Mujan Sovjet Unie	22	Oost-Borneo Indonesië
6	la Crouzille, Limousin, Forez, Vendée, Morvan Frankrijk	15	Janskij Sovjet Unie	23	Ningyô, Tôge, Tônô Japan
		16	Selemdscha-bekken Sovjet Unie		
7	St. Pierre du Cantal, Lodève Frankrijk				
8	Zwarte Woud West-Duitsland				
	Noord-en Midden-Amerika				
1	Port Radium Canada	8	Spokane Ver. Staten	15	Gulf Coastal Plain Ver. Staten
2	Beaverlodge Canada	9	Wyoming basins Ver. Staten	16	South East Alaska Ver. Staten
3	Baker Lake Canada	10	Colorado plateau Ver. Staten	17	Los Amoles Mexico
4	Cluff Lake, Key Lake, Rabbit Lake Canada	11	W. Central Arizona Ver. Staten	18	Aldama Mexico
		12	Black Hills Ver. Staten	19	La Coma, Buenavista, El Chapote Mexico
5	Rexpar Canada	13	Tallahassee Creek Ver. Staten		
6	Kelowna Canada	14	Grants Mineral Belt Ver. Staten	20	La Preciosa Mexico
7	Elliotlake, Agnewlake, Bancroft Canada				
	Zuid-Amerika				
1	Itataia Brazilië	5	Amorinopolis Brazilië	10	Don Otto Argentinië
2	Espinharas Brazilië	6	Quadilatero, Ferrifero Brazilië	11	Sierrą Pintada Argentinië
3	Campos Belos, Rio Preto Brazilië	7	Pocos de Caldas Brazilië	12	Malargue Argentinië
		8	Figueira Brazilië	13	Los Adobes Argentinië
4	la Goa Real Brazilië	9	Los Frailes Bolivia		
	Afrika				
1	Arlit, Akouta, Imourarem Niger	6	Mikouloungou, Oklo, Mounana Gabon	11	Karroo Zuid-Afrika
				12	Witwatersrand groep Zuid-Afrika
2	Djado Niger	7	Shinkolobwe Zaire		
3	Hoggar Algerije	8	Domes Area Zambia	13	Palabora Zuid-Afrika
4	Noord Togo Togo	9	Kariba lake Zambia	14	Mandrare Madagascar
5	Bakouma Centr. Afr. Rep.	10	Rossing Namibië	15	Antsirabe Madagascar
	Australië				
1	Yeelirrie West-Australië		Koongarra N.T.	4	Mount Painter, Beverley, Radium Hill etc. Zuid-Australië
2	Alligator Rivers Valley: Jabiluka, Narbalek, Ranger,	3	Mary Kathleen Queensland		

Tabel IV. Uraniumproducerende landen (ton *U*)

Land	vóór 1975	1975	1976	1977	1978	1979
Argentinië	278	22	40	100	126	185
Australië	7.800	0	359	356	516	600
Brazilië	0	0	0	0	0	103
Canada	103.670	3.510	4.850	5.790	6.803	6.900
Frankrijk	19.531	1.731	1.871	2.097	2.183	1.180
Gabon	5.448	800	niet bekend	1.408	1.022	1.000
West-Duitsland	56,2	57,1	37,8	14,7	41,1	niet bekend
Japan	33	3	2	3	2	niet bekend
Mexico	42	0	0	0	niet bekend	niet bekend
Namibië	0	0	654	2.339	2.697	3.692
Niger	3.342	1.306	1.460	1.609	2.060	3.300
Portugal	1.729	115	88	95	98	85
Zuid-Afrika	70.076	2.488	2.758	3.360	3.961	5.195
Spanje	170	136	170	180	191	339
Verenigde Saten	191.000	8.900	9.800	11.500	14.200	14.800
Zaïre	25.600	0	0	0	0	0
Totaal	428.775,2	19.068,1	22.089,8	28.851,7	33.900,1	38.379

Tabel V. Uraniummijnbouw en ertsverwerking in de VS (1979)

Onderneming	Plaats	Maximum Capaciteit (ton erts per dag)
Anaconda Company	Grants, New Mexico	6.000
Atlas Corporation	Moab, Utah	1.300
Bear Creek Uranium Company	Powder River Basin, Wyoming	2.000
Chevron Resource Company	Panna Maria, Karnes County, Texas	2.500
Conoco & Pioneer Nuclear, Inc.	Falls City, Texas	2.900
Cotter Corporation	Canon City, Colorado	1.500
Dawn Mining Company	Ford, Washington	500
Exxon, USA	Powder River Basin, Wyoming	3.000
Federal-American Partners	Gas Hills, Wyoming	970
Kerr-McGee Nuclear Corporation	Grants, New Mexico	7.000
Pathfinder Mines Corporation	Gas Hills, Wyoming	2.800
Pathfinder Mines Corporation	Shirley Basin, Wyoming	1.800
Petrotomics Company	Shirley Basin, Wyoming	1.500
Rio Algom Corporation	La Sal, Utah	750
Sohio Reserve	Cebolleta, New Mexico	1.600
Union Carbide Corporation	Uravan, Colorado	1.300
Union Carbide Corporation	Natrona County, Wyoming	1.200
United Nuclear Corporation	Church Rock, New Mexico	3.000
United Nuclear-Homesteake Partners	Grants, New Mexico	3.000
Western Nuclear, Inc.	Wellpinit, Washington	2.000
Western Nuclear, Inc.	Jeffery City, Wyoming	1.700
Totaal		48.380

Bron: Atomic Industrial Forum, Inc.

De totale produktie bedroeg in 1978 14.200 ton uranium uit erts met een gemiddelde concentratie van 0,13% uranium. De produktiecapaciteit is sindsdien nog sterk gestegen tot 25.000 ton in 1980. Uitbreiding van de produktiecapaciteit ook na 1980 was steeds voorzien, maar de prijsdaling van uranium op de wereldmarkt van de laatste jaren zal wellicht tot uitstel van deze plannen leiden.

Canada

 Canada was één van de eerste uraniumproducenten in de wereld; de exploratie

begon er al tijdens de Tweede Wereldoorlog ten behoeve van de Amerikaanse en Britse defensieprogramma's.
In 1956 waren er al meer dan 10.000 locaties ontdekt met een meer dan normale radioactiviteit van de bodem en in 1959 waren er drieëntwintig mijnen en negentien ertsverwerkingsfabrieken in vijf verschillende districten in bedrijf.
Sinds de volledige commercialisatie van de nucleaire industrie zijn er nog zes belangrijke mijnen in bedrijf bij Elliot Lake en Agnew Lake (Ontario) en in de provincie Saskatchewan. Locaties en produktiecijfers zijn gegeven in tabel VI.

Tabel VI. Uraniumertsverwerkingsfabrieken in Canada

	Plaats	Type erts (concentratie)	Nominale produktie ton *U*/jaar
A In bedrijf:			
• Agnew Lake Mines	Agnew Lake (Ont.)	conglomeraat	produktie d.m.v. uitlogen weinig succesvol
• Denison Mines	Elliot Lake (Ont.)	conglomeraat (0,1%)	3.500
• Eldorado Nuclear	Eldorado (Saskatch.)	adergesteente (0,1%)	900
• Gulf Minerals Canada	Rabbit Lake (Saskatch.)	adergesteente (0,5%)	2.250
• Madawaska Mines	Bancroft (Ont.)	pegmatiet (0,06%)	400
• Rio Algom	Elliot Lake (Ont.)	conglomeraat	3.500
B In aanbouw;			
• Amok	Cluff Lake (Saskatch.)	adergesteente	1.900 na 1981

Behalve de in de tabel vermelde mijnen en fabrieken die thans in produktie zijn, bestaan er vele plannen in allerlei stadia voor de in totaal zesendertig plaatsen, waar uranium in belangrijke hoeveelheden voorkomt, die thans bekend zijn. De verwezenlijking van deze plannen is afhankelijk van de vraag naar uranium op de wereldmarkt.
De totale Canadese jaarproduktie ligt thans rond de 6.500 ton, terwijl de aangetoonde voorraden beneden $125 per kg uranium 215.000 ton bedragen. De mogelijke voorraden beneden $175 per kg uranium zijn bij elkaar 728.000 ton uranium groot.

Australië
Na een periode van afwezigheid heeft Australië zich weer bij de uraniumproducerende en -exporterende landen gevoegd. De reserves (aangetoonde voorraden benden $80 per kg) zijn de laatste jaren door nieuwe vondsten gestegen van 6.200 ton in 1967 tot 290.000 ton in 1977. Bijna 80% van de thans aangetoonde voorraden bevindt zich in de Alligator Rivers Uranium Province in het vrijwel onbewoonde Northern Territory. In West-Australië bevindt zich naar schatting 13% van deze voorraden; de rest is verspreid over de overige delen van het land. In tabel VII zijn nadere gegevens vermeld over de Australische voorraden.
De totale produktie bedroeg in 1980 600 ton uranium, maar zal spoedig oplopen tot 4.700 ton in 1985, een produktie die echter sterk achter blijft bij de dan beschikbare capaciteit (12.000 ton per jaar).

Zuid-Afrika
De uraniumwinning in Zuid-Afrika is hoofdzakelijk een nevenaktiviteit van de goudmijnen. De uraniumproduktie vindt daarom niet altijd op optimale wijze plaats, daar steeds de optimalisering van de goudproduktie voorop staat.
De produktie is de laatste decennia sterk gestegen door zowel de gestegen goud- als

Tabel VII. Voornaamste uraniumafzettingen in Australië

Plaats	Voorraad ton U	Concentratie % U_3O_8	Staat	Produktie/Status projekt
Jabiluka	176.000	0,39	Northern Territory	Ondergrondse mijn in projektfase. Uiteindelijke capaciteit 7.600 ton per jaar
Ranger	85.000	0,26	Northern Territory	Dagbouwproduktie zal in 1982 starten; produktie 2.500 ton per jaar oplopend tot 5.000 ton per jaar.
Koongarra	11.300	0,27	Northern Territory	Dagbouwprojekt wachtend op goedkeuring van regering; produktie 900 ton per jaar.
Nabarlek	10.200	1,8 (max. 2,4%)	Northern Territory	Gehele ertslichaam van 9.000 ton uranium reeds gedolven. Produktie ertsverwerkingsfabriek start in 1981 met 900 ton uranium per jaar.
Yeelirrie	39.800	0,14	Western Australia	Goedkeuring voor exploitatie verkregen; ertsverwerkingsfabriek gereed in 1985. Produktie 2.000 ton per jaar.
Beverley	13.500	0,26	South Australia	Geen plannen voor exploitatie.
South Frome	4.300	niet bekend	South Australia	Geen plannen voor exploitatie.
Mount Pointer	3.200	0,10	South Australia	Geen plannen voor exploitatie.
Mary Kathleen	2.800	niet bekend	Queensland	Produktie thans 600 ton per jaar. In produktie sinds 1976.
Westmoreland	8.800	0,21	Queensland	Geen plannen voor exploitatie.

uraniumprijzen. In 1975 produceerde Zuid-Afrika 2.500 ton uranium, in 1980 was de produktie opgelopen tot 7.000 ton. In tabel VIII is een opsomming gegeven van de voornaamste produktiecentra.

Namibië

Namibië bezit één grote uraniummijn (Rossing Uranium) met een produktie van 5.000 ton in 1980, dezelfde als in 1979. In 1978 heeft een brand grote schade aangericht aan de ertsverwerkingsfabriek, die thans echter weer geheel hersteld is. Deze uraniumvoorraad is één van de grootste ter wereld en de kansen op verdere ontdekking van uraniumafzettingen in Namibië worden groot geacht.

Frankrijk

Frankrijk is het enige land in Europa dat een uraniumproduktie van enige betekenis heeft. In 1948 is de eerste grote voorraad uranium bij La Crouzille ontdekt, later gevolgd door die in de Limousin, Forez, Vendée en Morvan. Deze uraniumafzettingen zijn vrij aanzienlijk in omvang en nog steeds worden er ontdekkingen gedaan dankzij de continu voortgaande exploratie van potentiële uraniumafzettingen. Zo is bijvoorbeeld nog in 1979 in de buurt van Bordeaux een belangrijke uraniumafzetting ontdekt van naar schatting 20.000 ton uranium. Thans zijn in totaal op achttien locaties uraniummijnen in bedrijf, in aanbouw of reeds weer buiten gebruik gesteld.

De concentratie van het erts gebeurt in zes ertsverwerkende fabrieken die een totale produktie hebben van 3.100 ton uranium per jaar in 1980 en die zal oplopen tot ruim 4.000 ton uranium in 1990. De gehele uraniumproduktie wordt in Frankrijk voor binnenlands gebruik aangewend en is zelfs onvoldoende om aan de gehele binnenlandse behoefte te voldoen.

Tabel VIII. Uraniumproduktie in Zuid-Afrika

Lokatie	Aantal Uranium fabrieken	Produktie in 1980 verwerkt (1000 ton)	produktie (ton U)	Bijzonderheden
Vaal Reefs (Witwatersrand)	3	9.043	1.490	Ondergrondse mijnen; winning uranium uit bovengronds verzamelde slijkrestanten van de ertsbewerking.
Western Deep Levels (Witwatersrand)	2	1.629	180	idem
East Rand Gold en Uranium	1	18.289	250	idem; reeds 380 miljoen ton slijkrestanten bovengronds die over een periode van tien jaar zullen worden bewerkt.
Joint Metallurgical Scheme	1	6.100	828	idem; totaal zes goudmijnen leveren de uraniumhoudende slijkrestanten van de ertsbewerking.
Hartebeestfontein	1	3.078	369	Ondergrondse mijnen; winning uranium uit bovengronds verzamelde slijkrestanten van de ertsbewerking.
General Mining Finance Corp. (Buffelsfontein)	1	3.101	512	idem
West Rand Cons. (Stilfontein)	2	4.534	917	idem
God Field of S.A. (West Driefontein)	1	1.210	213	idem
Johannesburg Cons. Investment Corp. (Randfontein)	2	3.933	548	idem
Rand Mines (Blijvooruitzicht)	1	1.928	275	idem
Harmonie (Witwatersrand)	3	5.796	416	idem
Palabora (Transvaal)	1	18.000	120	Dagbouw kopermijn. Uranium is slechts een onbelangrijk bijprodukt.

Niger

Van de Zwart-Afrikaanse landen heeft Niger de grootste thans bekende uraniumvoorraden, hoewel er nog relatief weinig exploratiewerk is verricht. Op grond van geologische gegevens en de goede resultaten met het exploratiewerk mag de mogelijkheid van verdere ontdekkingen groot worden geschat.

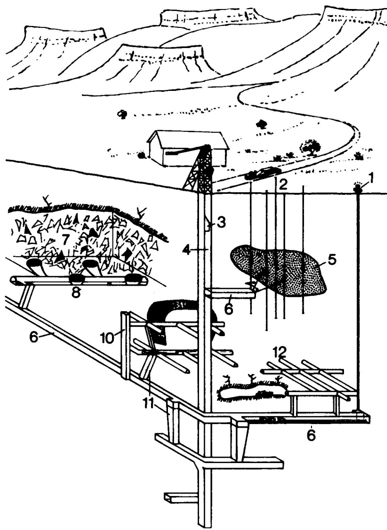
De huidige produktie (1980) bedraagt ruim 3.500 ton uranium per jaar en vindt plaats in een dagbouw-mijn in Arlit en een ondergrondse mijn in Akouta, ten westen van het Air-gebergte. De geplande ontwikkeling van de uraniummijnbouw in Niger is af te lezen in tabel IX.

Tabel IX. Uraniummijnbouw in Niger.

Locatie	Onderneming	Reserves (< \$80/kg$U$)	Produktie in ton U/jaar 1980	1981	1985	1990
Arlit	Somair	30.000	1.700	2.000	2.300	2.300
Akouta	Cominak	43.900	2.200	2.200	2.200	2.200
Imouraren	Imouraren	66.200	–	–	–	3.000
Arni	SMTT	20.000	–	–	1.500	1.500

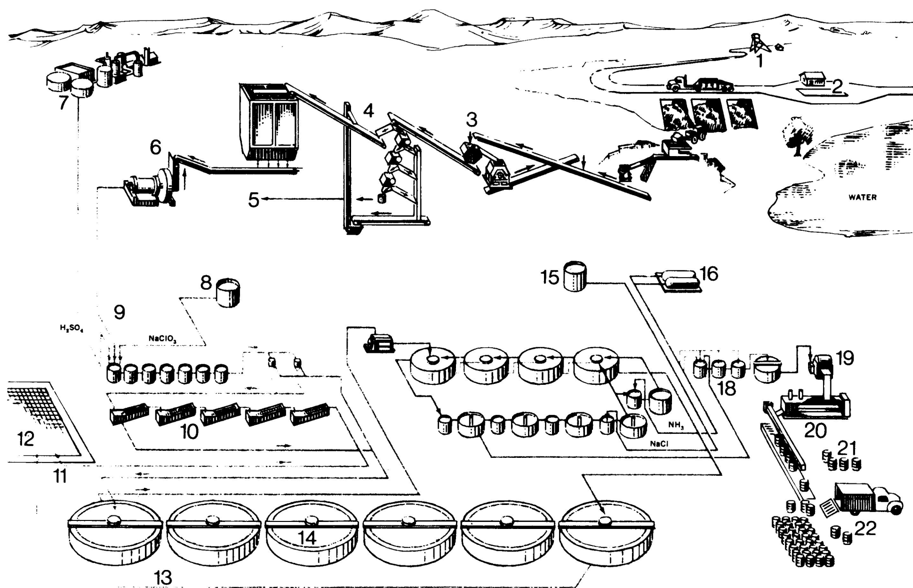
De winning van uranium

Uranium wordt gewonnen als erts dat veelal slechts ongeveer 0,2% uranium bevat. Bevindt het uraniumerts zich vlak onder het oppervlak dan kan de ertswinning in dagbouw plaatsvinden. Met gigantische graafmachines worden de afdeklagen verwijderd en daarna wordt het ertslichaam afgegraven tot diepten van 60 meter of meer.



Figuur 3
Ondergrondse uraniummijn
***1* ventilatie;**
***2* boorgaten;**
***3* lift;**
***4* schacht;**
***5* ertslichaam;**
***6* spoor;**
***7* gebroken erts;**
***8* ontginning door afbraak;**
***9* spleetontginning;**
***10* personenschacht;**
***11* ertsstorting;**
***12* ertsaders.**

Zit het ertslichaam dieper dan wordt het uranium gewonnen in ondergrondse mijnen. Een voorbeeld van zo'n ondergrondse mijn is te zien in figuur 3. De schacht kan in diepte variëren van 200 tot 500 meter en is uitgerust met een liftkoker, waarmee erts naar boven gebracht kan worden. Tevens kunnen er mensen en materiaal in afzonderlijke kooien worden vervoerd.
Vanuit de schacht worden op diverse niveaus tunnels uitgeboord in de niet-ertshoudende lagen. Deze tunnels worden onder de ertslichamen aangelegd, zodat de zwaartekracht gebruikt kan worden bij het winnen van erts. Het grondwater stroomt uit de tunnels naar de verzamelput op de bodem van de schacht vanwaar het water omhoog gepompt wordt voor het gebruik in de ertsverwerkingsfabriek. Ventilatiegaten met een diameter van één à twee meter verbinden de buitenwereld met de ondergrondse gangen. Grote ventilatoren zijn geïnstalleerd bovenop deze gaten om voldoende luchtcirculatie te krijgen. De kwaliteit van de luchtatmosfeer wordt voortdurend gecontroleerd.
Het in de uraniummijn gedolven erts moet ter plaatse worden verwerkt. Dit gebeurt in de ertsverwerkingsfabriek, waar het uraniumoxyde uit het erts wordt gehaald. Het schema van zo'n ertsverwerkingsfabriek is te zien in figuur 4. In grote vrachtwagens wordt het erts naar de nabijgelegen fabriek vervoerd, waarna het in maalstations wordt verpulverd tot uiteindelijk een waterige brij ontstaat, die geschikt is voor chemische behandeling. Natriumchloraat oxydeert het erts en zwavelzuur lost het uranium met andere aanwezige metalen op. Via vele stadia van wassen, opnieuw oplossen en weer wassen ontstaat tenslotte een produkt dat voor meer dan 75% uit uraniumoxyde bestaat. Het afval, dat in feite gewoon zand is, bevat geringe hoeveelheden uranium. Ruim 95% van al het uranium kan uit het erts worden verwijderd en slechts ± 5% blijft in het zand achter. De uraniumconcentratie van het erts, die bij aanvang bijvoorbeeld 0,2% is, is dus na behandeling in het zandafval verlaagd tot 0,01%. Een uiterst laag gehalte, dat op zeer vele plaatsen in de wereld voorkomt.



Figuur 4
Ertsverwerkingsfabriek *1* mijn; *2* weging; *3* verbrijzeling; *4* bemonstering; *5* monsteronderzoek; *6* opslag en vermaling van fijn erts; *7* zwavelzuurfabriek; *8* natriumchloraat; *9* uitloging; *10* uitwassing; *11* zandafval; *12* vijvers voor afvalopslag en indamping; *13* slikafval; *14* indikkers; *15* zoutoplossing; *16* ammoniak; *17* extractie; *18* neerslag; *19* filtrering; *20* drogen; *21* verpakking; *22* vervoer.

Afval van de ertsverwerkingsfabriek

Natuurlijk uranium dat zich nog in het erts bevindt, is daar in evenwicht met de radioactieve isotopen van de vervalreeksen van uranium-238 en uranium-235. Dit betekent dat ieder van deze isotopen een gelijke activiteit, uitgedrukt in curies (Ci) heeft. De isotoop uranium-234, die in zeer geringe mate (0,0055%) in natuurlijk uranium voorkomt, is één van de produkten uit de vervalreeks van uranium-238. Verder blijkt dat de activiteit van de uranium-235-vervalreeks veel geringer is dan die van de uranium-238-vervalreeks, zodat we in dit verband alleen de laatste wat nauwkeuriger zullen beschouwen. Uranium-238 vervalt via dertien dochterprodukten naar de stabiele isotoop lood-206 (^{206}Pb). Deze produkten, alsmede hun halveringstijden, staan vermeld in tabel X.

De natuurlijke activiteit van uranium-238 en van elk van de produkten uit de vervalreeks bedraagt 330 nCi (= $3{,}3.10^{-7}$Ci) per gram uranium. De totale activiteit van erts dat 0,2% uranium bevat bedraagt dan:

Totale ertsactiviteit = $14 \times 0{,}002 \times 3{,}3\ 10^{-7}$Ci/gram
= 9,2 milli-Curie per ton erts.

In de ertsverwerkingsfabriek worden de uraniumisotopen verwijderd, zodat twaalf van de veertien produkten uit de uranium-238-reeks achterblijven in het ertsafval.

Activiteit totaal ertsafval = $^{12}/_{14} \times 9{,}2$ nCi/gram
= 7,9 milli-Curie per ton ertsafval.

Tabel X. Dochterprodukten uit de vervalreeks van uranium-238.

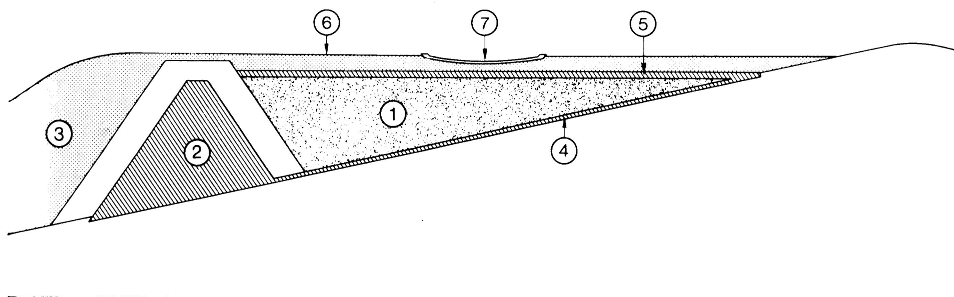
Isotoop	Voornaamste straling (MeV)	Halveringstijd
^{238}U*	(α) 4,2	4,51 x 10^{9} jaar
^{234}Th	(β) 0,19	24,1 dagen
^{234}Pa	(β) 1,2	6, 7 uur
^{234}U	(α) 4,7	2,47 x 10^{5} jaar
^{230}Th	(α) 4,6	8,0 x 10^{4} jaar
^{226}Ra	(α) 4,8	1620 jaar
^{222}Rn	(α) 5,5	3,82 dagen
^{218}Po	(α) 6,0	3,05 min.
^{214}Pb	(β) 0,7	26,8 min.
^{214}Bi	(β) 3,2	19,7 min.
^{214}Po	(α) 7,7	164 μs
^{210}Pb	(β) 0,02	22,3 jaar
^{210}Bi	(β) 1,20	5,0 dagen
^{210}Po	(α) 5,3	138 dagen
^{206}Pb	--- ---	stabiel

* Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368

Dit afval wordt gestort in bij de fabriek gelegen stortvijvers in de vorm van vast afval en vloeibare chemicaliën, waardoor zich in de loop der jaren een afvalberg gaat vormen. Vaak doet men dit op een enigszins hellend terrein, dat dan afgegrensd wordt door een 10 tot 15 meter hoge dam (figuur 3). De directe straling van deze afvalberg is geen probleem, alleen in de zeer directe omgeving zal de achtergrondstraling met enkele mrem per jaar toenemen ten opzichte van het natuurlijke niveau van ongeveer 200 mrem per jaar. Een punt waar echter wel aandacht aan geschonken moet worden is de aanwezigheid van het radium-226. Deze alfastraler heeft een zeer lange halveringstijd en vervalt dan tot het edelgas radon-222 dat eveneens een alfastraler is, met een halveringstijd van 3,8 dagen. Het inademen van deze alfastralers kan het risico van kankervorming in de bronchiën of in de longen vergroten. Belangrijk is dus dat voorkomen wordt dat door wind- of watererosie deze afvalhopen verspreid worden en dat het gevormde radon zoveel mogelijk in de afvalhopen wordt vastgehouden totdat het vervallen is tot de vaste loodisotoop 210.

We moeten ons echter realiseren dat dit radon ook gevormd zou zijn als het erts op de plaats gebleven was waar het zich oorspronkelijk bevond. Er wordt geen radioactiviteit toegevoegd. Vandaar ook dat radon van nature in onze atmosfeer voorkomt en zelfs in sterk wisselende concentraties, afhankelijk van de samenstelling van de bovenste aardlagen. Radon komt ook veelvuldig in drinkwater voor met concentraties tot boven twintig pico-Curie (pCi) per liter (p = pico = 10^{-12}). In bepaalde gebieden is zelfs 1.000 pCi per liter (Finland) niet ongebruikelijk. In Badgastein (Oostenrijk) wordt radonhoudend mineraalwater zelfs gebruikt voor (para) medische behandeling. Het bleek dat de radonconcentraties in het water daar varieerden van 500 tot 120.000 pCi per liter, rond een gemiddelde waarde van 40.000 pCi per liter. De radonconcentraties in lucht zijn normaliter van de orde van 0,1 pCi per liter in de open lucht tot 40 pCi per liter in gesloten ruimten, hetgeen veroorzaakt wordt door sommige bouwmaterialen. Bij uraniumvindplaatsen worden in de atmosfeer (natuurlijke) radonconcentraties gemeten van 0,2 tot 1,2 pCi per liter. De lucht bij de bronnen van Badgastein bevat plaatselijk zelfs 3.000 pCi per liter.

De afvalhopen van de ertsverwerkingsfabrieken veroorzaken inderdaad een verhoging van de radonconcentratie in de omringende lucht. Metingen in de Verenigde Staten geven als resultaat waarden tussen de 1,9 pCi en 3,6 pCi per liter lucht. Deze waarden liggen hoger dan de natuurlijke concentratie ter plaatse, maar



Figuur 5
Afdekking van mijnafval
***1* ertsafval;**
***2* kleilichaam;**
***3* dijklichaam;**
***4* 60 cm dikke kleilaag;**
***5* 80 cm dikke kleilaag;**
***6* 150 cm dikke kleilaag;**
***7* betonnen wateroverlaat.**

veel lager dan die, welke elders in de wereld al eeuwenlang geaccepteerd of zelfs aangeprezen worden als geneeskrachtig (Oostenrijk en het Centraal Massief in Frankrijk). Toch heeft men gemeend iets aan dit mijnafval te moeten doen. In het verleden werd het zelfs wel eens als bouwmateriaal gebruikt voor huizen en zwembaden. Dit is thans verboden. De afvalbergen worden nu afgedekt met een laag aarde om de erosie te voorkomen, die verspreiding van het gevormde radon in de atmosfeer tot gevolg zou hebben (zie figuur 5).
Een meer rigoureuze methode zou zijn om het thorium en radium uit het afval af te scheiden. Deze reiniging vraagt echter om toevoeging van een extra scheidingsstap in de ertsverwerkingsfabriek en is vrij kostbaar. Het probleem van het radiumhoudend ertsafval zou daarmee volledig opgelost worden. Gezien echter het feit dat vrijwel alle ertsafvalhopen in zeer dun bevolkte streken liggen en op enige afstand van deze afvalhopen nauwelijks iets meetbaar is van verhoogde radonconcentraties, lijkt de kostbare methode van thorium en radiumafscheiding voorlopig niet noodzakelijk.

Literatuur

E. Gärtner, *Uran-Produktion und Gewinnung, Brennstoffkreislauf und Möglicher Beitrag zur Energieversorgung.* Glückauf, Essen 1977.

H.D. Fucks, *Exploration und Gewinnung von Uran.* Informationstagung SVA, Zürich, Mařz 1977.

World Uranium-Geology and Resource Potential, Report on Phase I of IUREP. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Cooperation and Development, Parijs 1980.

Uranium-Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD/NEA and IAEA. Organisation for Economic Cooperation and Development, Parijs 1979.

Fuel and Heavy Water Availability, Report on INFCE Working Group I, International Atomic Energy Agency, Wenen, januari 1980.

A. van Dalen, Uraan als Bijprodukt bij de Forforzuurproduktie, *Energiespectrum,* maart 1980, blz. 77.

F.E. McGinley, *Potential Byproduct Uranium Production in the United States,* International Symposium on Uranium Evaluation and Mining Techniques. IAEA-SM-239/15. International Atomic Energy Agency, Wenen.

F.E. McGinley, *Results of Low Grade Uranium Studies,* United States Department of Energy Seminar, Grand Junction, oktober 1979.

Toekomstige Energie-Situatie in Nederland (TESIN), hoofdstuk 3, Vereniging van Directeuren van Elektriciteitsbedrijven in Nederland, Arnhem 1980.

Prior Consent and Security of Supply in International Nuclear Trade, Uranium Institute, Londen, oktober 1980.

J.A. Goedkoop, Andersoortig radioactief afval, *Energiespectrum,* november 1979, blz. 274.

G.A. Watford and J.A. Wethington jr., Radiological Hazards of Uranium Mill Tailings Piles, *Nuclear Technology 53,* juni 1981.

Report to the General Assembly, Annex B, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations, New York 1977.



De open 'Osamu Utsumi' uraniummijn in Minas Gerais Brazilië

7. VERRIJKING VAN SPLIJTSTOF

M. Bogaardt

In de meest gangbare kernreactoren, waar gewoon water als remstof wordt gebruikt, kan men natuurlijk uranium als splijtstof niet toepassen. Dit bevat te weinig splijtbare kernen van de isotoop uranium-235 om een kettingreactie op gang te brengen, gezien het feit dat het water betrekkelijk veel splijtingsneutronen absorbeert. Na een kunstmatige vergroting van het aantal splijtbare kernen komt die kettingreactie wèl op gang. De verrijking van natuurlijk uranium in de isotoop uranium-235 gebeurt in de praktijk met behulp van gasdiffusie en ultracentrifuges. Daartoe wordt het natuurlijke uranium gebonden aan fluor, zodat een gas ontstaat. Bij het diffusie-procédé wordt dit gas door een cascade van poreuze wanden geperst, waardoor de betrekkelijk lichte isotopen uranium-235 stap voor stap steeds meer worden gescheiden van de betrekkelijk zware isotopen uranium-238. Bij het ultracentrifuge-procédé wordt het gas gevoerd door een cascade van snel ronddraaiende trommels, waarin de zware isotopen meer tegen de wand worden geslingerd dan de lichte, zodat ook hier stap voor stap een steeds betere scheiding wordt bereikt. Een analyse laat zien, dat het tweede procédé technisch moeilijker maar economisch aantrekkelijker is dan het eerste.

Reactorsplijtstof bestaat in de regel uit uranium dat enigermate is verrijkt in de isotoop uranium-235. Dit hoofdstuk gaat in op de noodzaak van verrijking, de methoden die daarvoor ter beschikking staan en de praktische techniek.

Noodzaak

In de natuur komt uranium voor in de vorm van een mengsel van de isotopen uranium-235 en uranium-238, in de verhouding 1:139. De concentratie van uranium-235 in natuurlijk uranium is derhalve 0,71%. In thermische kernreactoren wordt de kern uranium-235 verspleten door de vangst van een thermisch (langzaam) neutron. Er is echter een kleine kans dat de vangst van dit neutron niet tot splijting leidt, maar tot de vorming van uranium-236. Ook uranium-238 kan thermische neutronen vangen. Daarbij treedt als regel geen splijting op en wordt uranium-239 gevormd. Dit vervalt tot neptunium-239, wat weer vervalt tot plutonium-239. Weliswaar is de laatste kern met een thermisch neutron te splijten, maar toch kan men niet stellen dat uranium-238 dus met twee neutronen wordt verspleten. Met het verval van uranium-239 naar plutonium-239 is geruime tijd gemoeid en in die tijd kunnen neutronen verloren gaan door parasitaire vangst. Bij splijting komen, behalve de splijtingsprodukten, gemiddeld iets meer dan twee neutronen vrij. Gelet op de talrijke vangstprocessen met uranium-238 die in natuurlijk uranium mogelijk zijn, is het in het algemeen niet mogelijk om met de vrijkomende neutronen een kettingreactie van splijtingen in uranium-235 op gang te houden. Daarom vergroot men de verhouding tussen de isotopen uranium-235 en uranium-238.

Tabel I. Benodigde voeding F en scheidingsarbeid SW, uitgedrukt in kg, per kg verrijkt produkt P met een concentratie x_P bij verschillende concentraties x_T van de afvalstroom; de concentraties zijn aangegeven in procenten (zie ook de navolgende tekst).

x_T	$x_p = 2,5$		$x_p = 3,0$		$x_p = 3,5$	
	F	SW	F	SW	F	SW
0,20	4,5	3,23	5,5	4,31	6,5	5,42
0,25	4,9	2,84	6,0	3,81	7,0	4,81
0,30	5,4	2,54	6,6	3,42	7,8	4,34

Behalve de verstorende rol van het alleen indirect splijtbare uranium-238, dat neutronen aan de reactie onttrekt, moet ook de invloed van de neutronenremstof, het reactorkoelmiddel en de constructiematerialen in rekening worden gebracht. Ook hier gaan neutronen verloren. Wanneer deze invloed al te grote vormen aanneemt is men gedwongen de parasitaire vangst te compenseren door meer neutronen per volume-eenheid van de splijtstof te produceren. Dit kan alleen gedaan worden door de isotopenverhouding van de splijtstof ten gunste van de isotoop uranium-235 te wijzigen.

In sommige reactoren, met name de grafiet-gemodereerde en de met zwaar water gemodereerde systemen, heeft men lange tijd een zodanige neutroneneconomie kunnen realiseren dat de toepassing van natuurlijk uranium als splijtstof goed genoeg was. Naarmate echter naar grotere versplijtingsgraden van de splijtstof werd gestreefd, bleek dat ook voor deze reactoren een lichte aanvangsverrijking van de splijtstof gewenst was. Bij een hoge versplijtingsgraad is namelijk per definitie ook een vrij grote hoeveelheid afvalprodukten van het splijtingsproces opgeslagen. Deze afvalprodukten leiden tot additionele parasitaire absorptie.

In de zogenaamde lichtwaterreactoren moet in ieder geval met een vrij aanzienlijke aanvangsverrijking worden gewerkt. In plaats van 0,7% zal het splijtstofmengsel ca. 3% uranium-235 moeten bevatten. De reactoren van het lichtwatertype (BWR en PWR) worden het meest toegepast; zij leveren dus het overgrote gedeelte van de behoefte aan verrijkingsarbeid. Verrijkingsarbeid wordt in de internationale literatuur aangeduid met SWU (*separative work unit*), de eenheid van scheidingsarbeid. De dimensie van deze eenheid is de kilogram. Eenheden van scheidingsarbeid worden vaak in metrische tonnen aangegeven (tSW).

Wanneer men zich zet aan het verrijken van uranium, bestaat de invoer (de voeding) uit natuurlijk uranium, het produkt uit verrijkt uranium met de gewenste verrijkingsgraad en de afvalstroom uit verarmd uranium. In de praktijk van de verrijking voor kernenergiecentrales ligt de gevraagde verrijkingsgraad van het produkt meestal tussen 2,5 en 3,5%. Voor de concentratie van de afvalstroom wordt de keuze bepaald op grond van de kosten van het voedingsmateriaal en de kosten van de verrijkingsarbeid. Naarmate de voeding duurder is zal men de afvalstroom verder willen uitputten, maar voor iedere tiende procent verarming van de afvalstroom moet verrijkingsarbeid worden verricht, die moet worden betaald. Er is dus een economisch optimum dat zich op ieder moment voor de twee hierboven genoemde parameters laat bepalen. Tabel I geeft een voorbeeld van de afhankelijkheid van benodigde voeding en benodigde hoeveelheid scheidingsarbeid van de gekozen verrijkings- en verarmingspercentages.

Voor een beter begrip van de getallen in deze tabel moge het volgende dienen. De materiaalstromen bij het verrijkingsproces zijn
- de invoer van natuurlijk uranium, aangeduid met *F (feed)*;
- het verrijkte uranium, aangeduid met *P (product)*;
- het verarmde uranium, aangeduid met *T (tail)*.

De concentratie uranium-235 wordt hieronder voorgesteld door x_i, waarin $i = F, P$ of T, al naar gelang men de gewichtsfractie in de invoer, in het produkt of in het afval wil aangeven. Men kan nu de volgende massabalansen opstellen:

voor het natuurlijk uranium: $F = P + T$
en voor het uranium-235: $Fx_F = Px_P + Tx_T$.

Uit deze vergelijkingen volgt:

$$F = \frac{x_P - x_T}{x_F - x_T} . P$$

Met bijvoorbeeld x_P = 3% en x_T = 0,3% vindt men F = 6,57 P. Men moet dan 6,57 maal zoveel natuurlijk uranium inkopen als men aan verrijkt uranium nodig heeft.
De scheidingsarbeid wordt bepaald uitgaande van de mathematische behandeling van een ideaal scheidingsproces. Men kent daarin de scheidingspotentiaal V_i, die gegeven wordt door de formule:

$$V_i = (2x_i - 1)\, ln \left(\frac{x_i}{1 - x_i} \right), \text{ waarin } i = P, T \text{ of } F.$$

De scheidingsarbeid wordt nu gevonden uit het produkt van de massa met deze potentiaal. De toegevoegde scheidingsarbeid (SW) is dus:

$$SW = PV_P + TV_T - FV_F.$$

Daar de hoeveelheden P, T en F aangegeven worden in kilogrammen en de scheidingspotentiaal V_i dimensieloos is, kan men hieruit zien dat de scheidingsarbeid de dimensie kilogram heeft.

Gasdiffusie

Er zijn in de loop van de laatste driekwart eeuw allerlei isotopenscheidingsmethoden toegepast, de meeste echter niet anders dan in onderzoekslaboratoria. Het aantal scheidingsprocessen dat serieus is onderzocht voor industriële toepassing is echter zeer beperkt en van dit kleine aantal zijn er slechts een tweetal tot industriële wasdom gekomen. Deze twee zijn de gasdiffusiemethode en de ultracentrifugemethode. Daarnaast bestaan het straalpijp- en het heliconproces, respectievelijk ontwikkeld in West-Duitsland en Zuid-Afrika. Op grote schaal worden deze processen nog niet toegepast. Geavanceerde scheidingsprocessen, zoals het *laser*proces en het plasmaproces, zijn nog *in statu nascendi*. Of het ooit tot grootschalige toepassing zal komen is niet duidelijk. Wat betreft de *laser*verrijking toont men in de Verenigde Staten toch een zekere mate van vertrouwen, zij het dat de toepassing niet voor 1995 waarschijnlijk wordt geacht.
Gasdiffusie is de oudste van de bestaande scheidingsmethoden. Deze wordt sinds 1945 op grote schaal in de Verenigde Staten toegepast. Later hebben ook Engeland, Frankrijk, de Sovjet-Unie en China zich er op toegelegd. De Engelse toepassing is inmiddels al weer geëindigd. In Frankrijk wordt de gasdiffusie op zeer grote schaal toegepast (Tricastin). In de Sovjet-Unie bestaat eveneens een grote gasdiffusie-scheidingsinstallatie, maar de graad van technische geavanceerdheid daarvan is niet bekend. China heeft indertijd met Russische steun een kleine scheidingsinstallatie op basis van gasdiffusie kunnen bouwen.

Tabel II. Gasdiffusie-capaciteit in ton scheidingsarbeid per jaar

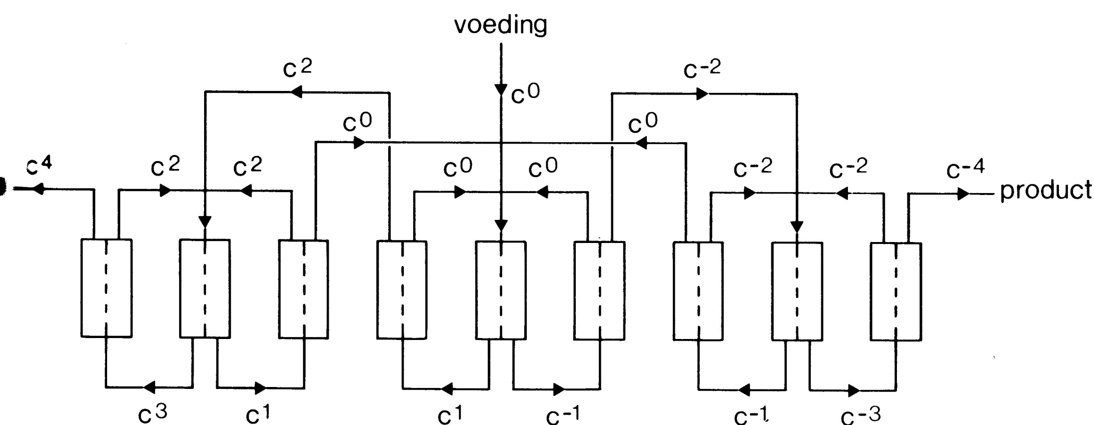
V.S.	27.300
Frankrijk	10.800
USSR	8.000
China	200

Het principe van de gasdiffusiemethode is dat van de moleculaire diffusie van uranium-hexafluoride (UF_6) in gasvormige toestand door een poreuze wand. Door

geschikte keuze van het aantal poriën en de verdeling van hun diamaters wordt het gewenste scheidingseffect tot stand gebracht. Doordat in een situatie van thermisch evenwicht de moleculen van de zwaardere isotoop minder vaak tegen de wand botsen en een geringere penetratiekans hebben dan de moleculen van de lichtere isotoop, wordt aan de achterzijde van de wand een verrijking in de lichte isotoop aangetroffen. Het proces bestaat hieruit, dat het doorgelaten mengsel opnieuw op druk wordt gebracht en in een volgende cel weer aan een diffusie door een poreuze wand wordt onderworpen. Theoretisch is gemakkelijk aan te tonen dat de ideale waarde van de elementaire verrijkingsfactor per stap gegeven wordt door de volgende formule:

$$\alpha_0 = \sqrt{M_2 / M_1}$$

waarin M_1 en M_2 de moleculaire gewichten voor het lichte en zware molecuul zijn. Voor UF_6 is dit theoretisch maximum α_0 = 1,0043. Het gevraagde effect voor verrijking van 0,7 naar 3% wordt verkregen door de diffusie door de poreuze wanden ca. duizend maal te herhalen. In de praktijk betekent dit dat het gas telkens weer moet worden gecomprimeerd, want bij de diffusie treedt een zekere expansie op. Daarbij koelt het gas enigszins af. Verdere afkoeling vindt plaats in een warmtewisselaar, waarna het gas gecomprimeerd wordt voor de volgende diffusieronde. De grote kunst van het gasdiffusieproces is het ontwerp en de nauwkeurige fabricage van diffusiebarrières (de poreuze wanden).
In principe wordt in iedere diffusie-cel de ingaande stroom dus verdeeld in een verrijkte stroom, die achter de barrière wordt afgetapt en een verarmde stroom, die het restant vormt van wat zich aan de voorzijde van de barrière ophoudt. De cellen laten zich nu in een cascadevorm schakelen, zoals is aangegeven in figuur 1.



Figuur 1
Verrijkings- en verarmingscascade. Elk element in deze cascade heeft een concentratiefactor *c*.

De scheidingsfabrieken op basis van gasdiffusie kenmerken zich door:
a. veelvuldig herhalen van de elementaire scheiding in zeer veel verrijkings- en verarmingstrappen, wat leidt tot een zeer hoge energiebehoefte en

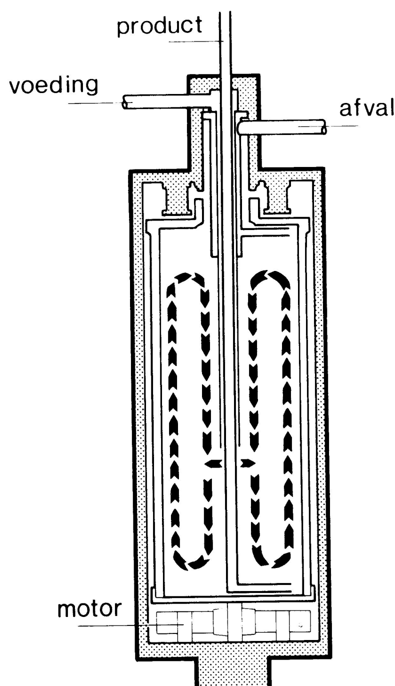
b. een zeer grote omvang, waarbij de installatie economisch begint te renderen.
Wat het eerste punt betreft: de specifieke energiebehoefte van het gasdiffusieproces is ca. 2.400 kWh/SWU. Bij het hieronder te behandelen ultracentrifugeprocédé is dit slechts 80 kWh/SWU. De minimale economische afmeting is ca. 10.000 tSW per jaar. Deze capaciteit moet vrijwel ineens worden gebouwd en in bedrijf genomen op straffe van zeer grote initiële verliezen. Ook hier kan het ultracentrifugeproces als gunstige tegenhanger worden aangewezen: de minimale economische afmeting is waarschijnlijk eerder bij 2.000 dan bij 3.000 tSW per jaar gelegen, terwijl het in gebruik stellen zonder significante aanloopverliezen in de loop van vele jaren kan worden gerealiseerd. Daarbij is een flexibele opbouw mogelijk, precies afgestemd op de leveringsbehoeften.

Ultracentrifuge

De eerste scheiding van uranium-isotopen met een ultracentrifuge werd reeds in 1940 in de VS uitgevoerd door Jesse en Beams. In de Tweede Wereldoorlog en daarna werden ook in Duitsland ontwikkelingswerkzaamheden verricht aan het ultracentrifugeprocédé, zonder dat deze bijzonder succesvol waren. In Rusland leidde de samenwerking tussen krijgsgevangen gemaakte Duitse wetenschappelijke onderzoekers en Russische ingenieurs tot doorbraken in de technologie. Bij terugkeer van de Duitse geleerden uit Rusland werd ook een nieuwe impuls aan het onderzoek in het Westen gegeven. In 1960 werd het ultracentrifuge-onderzoek in de VS weer opgevat.

Ook in Nederland en West-Duitsland kwam rond die tijd het in Rusland ontwikkelde, vertikaal staande type centrifuge in de belangstelling. Later, in de jaren zestig, was dat ook het geval in het Verenigd Koninkrijk. In 1970 werd tussen Nederland, West-Duitsland en Engeland een samenwerkingsverdrag (verdrag van Almelo) gesloten als gevolg waarvan de tripartite verrijkingsorganisatie Urenco werd opgezet. Urenco is thans het enige bedrijf ter wereld dat het ultracentrifugeprocédé op industriële schaal toepast.
De scheiding van uranium-isotopen door middel van ultracentrifuges berust op het verschil in gewicht van de beide atoomkernen. Van dit gewichtsverschil wordt gebruik gemaakt door UF_6-gas in een centrifugaal veld te brengen. In de ultracentrifuges wordt het gas zeer snel geroteerd in een snel draaiende trommel, waardoor zich concentratieverschillen van de beide isotopensoorten instellen. Een principeschets van de centrifuge wordt gegeven in figuur 2.

Figuur 2
Principe van de ultracentrifuge.



In de centrifuge verdeelt het gas zich ten gevolge van de rotatie op een zodanige wijze dat een drukopbouw plaatsvindt volgens de formule:

$$P_r = P_{as} \exp \frac{M\omega^2 r^2}{2RT}$$

Hier is P_r de druk op afstand r van de as, waar de druk P_{as} is, M de massa van het UF_6-molecuul, ω de hoeksnelheid, R de gasconstante en T de absolute temperatuur.
De isotopen verdelen zich door het verschil van gewicht ieder volgens hun eigen drukopbouw en de verhouding tussen die twee wordt gegeven door de onderstaande formule:

$$(P_1/P_2)_r = (P_1/P_2)_{as} \exp \frac{(M\text{-}M_2)\,\omega^2 r^2}{2RT}$$

Hier hebben de subscript 1 en 2 betrekking op de lichte, resp. de zware isotoop van uranium in het UF_6-molecuul.
Zoals blijkt wordt het verschil in drukopbouw beheerst door het verschil van de moleculaire gewichten, (M_1-M_2, of ΔM).
De elementaire verrijkingsfactor laat zich derhalve uitdrukken als:

$$\alpha = \exp \frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT}$$

Het interessante is dat de elementaire scheidingsfactor beheerst wordt door het *verschil* in de moleculaire gewichten M_1-M_2, terwijl dat voor de gasdiffusiemethode beheerst wordt door de *verhouding* van de moleculaire gewichten $M_1 \,/\, M_2$.
In tabel III staan enkele waarden van de elementaire scheidingsfactor aangegeven als functie van de omloopsnelheid van de centrifugetrommel.

Tabel III. Scheidingsfactor α bij enkele waarden van de omtreksnelheid ωr in meters per seconde.

ωr	α
400	1,101
500	1,162
600	1,242
700	1,343

De scheiding van isotopen in de centrifuge kan pas volledig tot haar recht komen, indien zich een evenwichtstoestand instelt. Dit wordt bereikt door de centrifuges in tegenstroom te laten werken. In figuur 2 is aangegeven op welke wijze de tegenstroom wordt gerealiseerd. Tengevolge van de zeer steile drukopbouw in de centriruge, die maakt dat een zeer groot gedeelte van het interieur van centrifugetrommel paktisch vacuüm bevat, speelt het scheidingsproces zich in feite in een zeer beperkte zône dicht bij de centrifugewand af. De interne circulatie van het gas wordt teweeggebracht door mechanische middelen en door het in stand houden van een temperatuurverschil over de lengte van de trommel.
Het scheidingseffect dat een centrifugetrommel teweeg kan brengen, wanneer daarin gas wordt geleid via het centraal gesitueerde inlaat- en afvoersysteem, ziet er als volgt uit:

$$\delta U = \eta \varrho D \left(\frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT}\right)^2 \frac{\pi L}{2}$$

In deze formule staat η voor de efficiëntie van de centrifuge, die bepaald wordt door de interne stroming. De dichtheid ϱ, vermenigvuldigd met de zelfdiffusie-coëfficiënt D en het massaverschil ΔM, is een eigenschap van het procesgas (UF_6). De omtreksnelheid (ωr) en de lengte van de rotor L zijn grootheden, die bepaald worden door de constructie.

Het scheidingsrendement van de trommel, δU, neemt toe met de vierde macht van de omtreksnelheid. Hoge snelheden zijn dus gewenst. De efficiëntie, die bepaald wordt door de interne stroming, neigt er echter toe snel af te nemen met toenemende omtreksnelheid. In de praktijk is bij de toegepaste omtreksnelheden het rendement afhankelijk van een behoorlijk geringere macht van de omtreksnelheid. Dit fenomeen hangt goeddeels af van het reeds gesignaleerde effect dat het centrale gedeelte van de trommel praktisch geen UF_6-gas bevat.

Het scheidingsrendement van de centrifuge is recht evenredig met de lengte van de rotor. Grote lengte is dus voordelig. De lengte wordt echter weer beperkt door de dynamica van de snel roterende trommel, die vergeleken kan worden met een pijp. Iedere pijp bezit een aantal kritische frequenties, die door de buigingstoestanden worden bepaald. De ontwerper moet rekening houden met deze frequenties, omdat de centrifuge door kritische trillingstoetanden heen moet komen om de uiteindelijk gewenste bedrijfsfrequentie te kunnen halen. Dit maakt het ontwerp van de centrifuges moeilijk. Die ongewenste buigingen moeten in dempers worden onderdrukt, teneinde de energiedissipatie in de kritische trillingstoestanden te kunnen beperken. De maximaal toelaatbare omtreksnelheid van de rotor wordt bepaald door het gekozen constructiemateriaal. De specifieke sterkte bepaalt de maximale omloopsnelheid, terwijl de kritische frequentie bepaald wordt door de elasticiteitsmodulus en door de dichtheid.

Men vindt dat:

$\omega r = \sqrt{\sigma / \varrho}$,

waar σ de materiaalsterkte is, en:

$\omega / r = \text{(constante)} \sqrt{E / \varrho}$,

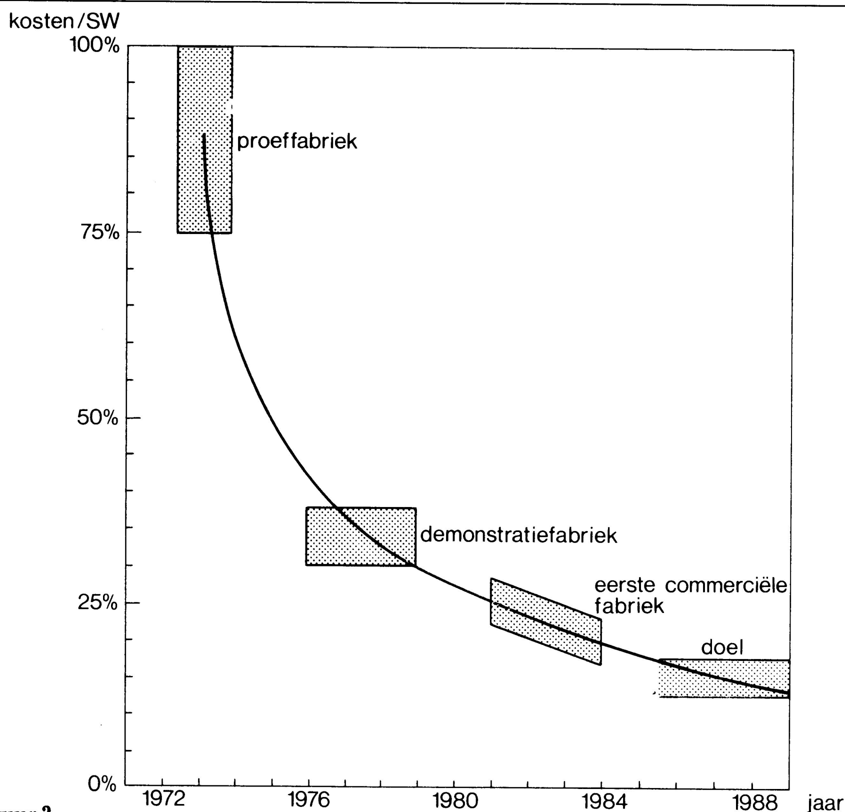
waar E de elasticiteitsmodulus is.

Een groot aantal materialen zou in aanmerking kunnen komen voor toepassing in centrifuges, rekening houdend met sterkte, elasticiteit, corrosieweerstand, etc. In tabel IV zijn de merites van een aantal materialen weergegeven. Hierbij valt op dat de vezelmaterialen bijzonder attractief lijken. Men moet hierbij echter wel in aanmerking nemen dat de anisotropie en vaak de temperatuurgevoeligheid van het materiaal de attractie in sterke mate kunnen beperken.

Tabel IV. Eigenschappen van trommelmaterialen

	sterkte in $10^7 N/m^2$	dichtheid in kg/m^3	ωr in m/s	E in $10^3 N/m^2$	relatief scheidings rendement
Metalen					
aluminiumlegering	40	2.800	370	70	1
titaniumlegering	80	4.700	410	105	1,20
maraging steel	200	8.100	500	185	1,79
beryllium	25	1.800	360	280	1,56
Vezels					
glasvezelhars	160	2.100	650	15	2,25
Aramidvezelhars	120	1.400	650	25	2,90
koolstofvezelhars	120	1.600	650	75	3,60

Resumerend kunnen we stellen dat er drie parameters van belang zijn voor de prestatie van een centrifuge: de scheidingsefficiëntie, de lengte en de omtreksnelheid. In de loop van de centrifuge-ontwikkeling hebben de onderzoekers en de constructeurs zich voortdurend beziggehouden met een optimalisatie van deze parameters. De laatste tien jaren is de prestatie van de enkelvoudige centrifuge acht- tot tienmaal verbeterd.
Voor de economische beoordeling van de scheiding door middel van ultracentrifuges is van belang dat de scheidingsfactor per trap behoorlijk hoog is: zeker beter dan 1,3. Dat betekent dat men met weinig trappen in de cascade kan volstaan. Voorts wordt het gas door de centrifuges zelf van de ene trap naar de volgende vervoerd, aangezien immers de aftap plaatsvindt in het hart van de volgende centrifuge, waar de druk laag is. Dit houdt in dat er geen compressoren nodig zijn en dat het energieverbruik voor de scheiding beperkt is tot die energie die nodig is voor het aandrijven van de centrifuges. Vergeleken met de 2.350 kWh per scheidingseenheid in moderne gasdiffusie-installaties is de benodigde energie van 80 kWh/SWU in een moderne gascentrifuge-installatie bijzonder attractief.
De geweldige verbetering in de prestatie van centrifuges, zoals die hierboven is weergegeven, heeft geleid tot een zeer sterke verbetering van de economische merites, zoals in figuur 3 is weergegeven.



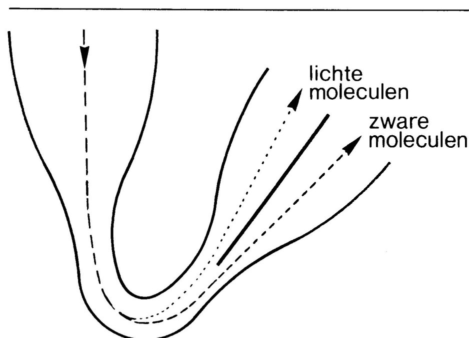
Figuur 3
Afname van de kosten van scheidingsarbeid door optimalisatie van de ultracentrifuge.

De bouwprogramma's voor Urenco volgen uit het totale orderpakket dat Urenco heeft verworven. In totaal omvat dit orderpakket leveranties voor ca. 6 miljard gulden. Om aan deze verplichtingen te voldoen moet door Urenco ruim 2.000 tSW per jaar aan scheidingscapaciteit worden geïnstalleerd en wel in de Urenco verrijkingsinstallaties in Capenhurst (Engeland), Almelo en Gronau (West-Duitsland). In Gronau is nu met de bouw een aanvang gemaakt. Verwacht wordt dat hier rond

1985 de eerste verrijking zal kunnen plaatsvinden.
In Almelo zijn thans een viertal fabrieken gebouwd. Een Nederlandse proeffabriek SP1, een Duitse proeffabriek SP2, een demonstratiefabriek SP3 en een industriële scheidingsfabriek SP4. Van deze laatste is thans de eerste tranche à 400 tSW per jaar in aanbouw, die in oktober 1981 in bedrijf is gesteld. De totale capaciteit van Urenco is op dit moment ca. 450 tSW per jaar en zij zal in 1985 ca. 1.000 tSW per jaar bedragen, in 1990 3.500 tSW per jaar en 1995 4.500 tSW per jaar. Hoeveel van deze capiteit uiteindelijk in Almelo zal komen te staan, is niet met zekerheid te voorspellen.

Andere methoden

In het Kernenergie-onderzoekinstituut te Karlsruhe is een methode ontwikkeld, waarbij eveneens van een centrifugaal veld gebruik wordt gemaakt. Deze methode gebruikt geen roterende apparatuur, afgezien van gascompressoren. Het principe is dat snelstromend UF_6 in een cirkelvormig kanaal wordt geblazen, waardoor separatie plaatsvindt (zie figuur 4). De inblazing geschiedt met een straalpijp, ook wel *nozzle* genoemd. Teneinde voldoende hoge snelheden te kunnen halen, wordt het UF_6-gas gemengd met een dragergas, in dit geval waterstof. Het mengsel bevat 4 à 5 % UF_6.



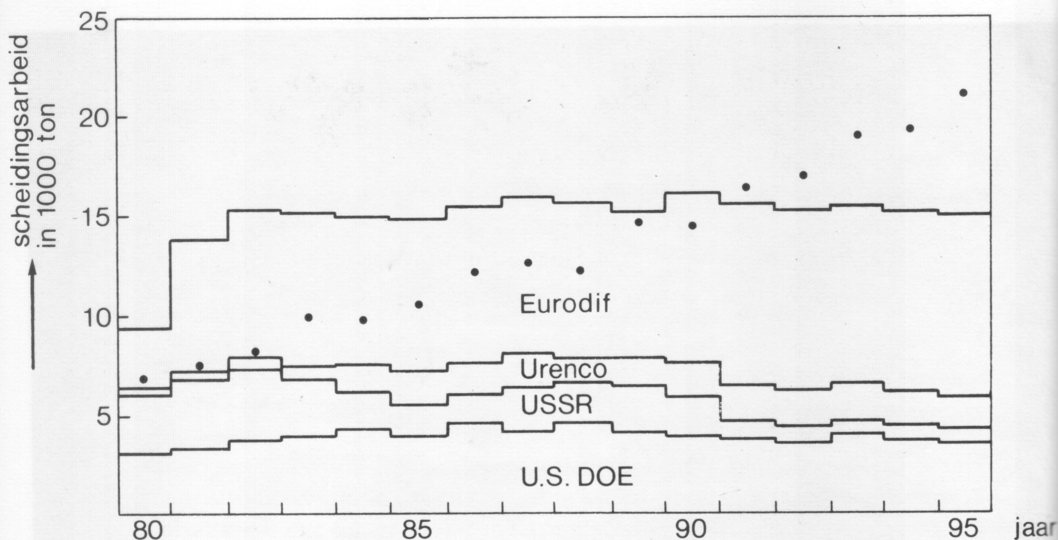
Figuur 4
Principe van de straalpijpverrijking. De zware moleculen 'vliegen meer uit de bocht' dan de lichte en worden na doorgang door de bocht van deze lichte moleculen afgezonderd door een scheidingswand.

De straalpijpscheiding laat elementaire scheidingsfactoren toe in de orde van α_0 = 1,048 als theoretisch maximum. Dat betekent dat voor een verrijking van natuurlijk uranium van 0,7% tot een produktconcentratie van 3,5% ca. 500 stappen nodig zijn. Doordat het UF_6 in volume zo vergroot wordt door de menging met veel waterstof, wordt het benodigde compressorvermogen zeer groot. Men moet rekening houden met een specifieke energiebehoefte van ca. 4.000 kWh/SWU.
Het zogenaamde heliconproces, dat in Zuid-Afrika is ontwikkeld, schijnt in zeer grote mate overeenkomst te vertonen met een straalpijpprocédé van de Duitsers, zij het dat hier met een nog grotere overmaat waterstof of helium als dragergas wordt gewerkt. De procesgegevens zijn door de Zuidafrikaanse autoriteiten zeer zorgvuldig geheim gehouden.
Door middel van de laserscheiding wordt een reeds vroeger aangedragen mogelijkheid van scheiding door selectieve fotochemische reacties weer actueel. Het laserscheidingsprogramma berust in zeer sterke mate op de enorme ontwikkeling die lasers van groot vermogen voor militaire toepassingen ondergaan. Er zijn twee laserscheidingsprocessen, één dat gebruik maakt van uraniumdamp en één waarbij uranium-hexafluoride-moleculen worden geëxciteerd.
In het geval van uraniumdamp wordt een straal van neutrale uraniumdamp in een vacuümoven gegenereerd. De uittredende dampstroom wordt bestraald met lasers, die leiden tot een selectieve ionisatie van de uranium-235-atomen. De aldus ont-



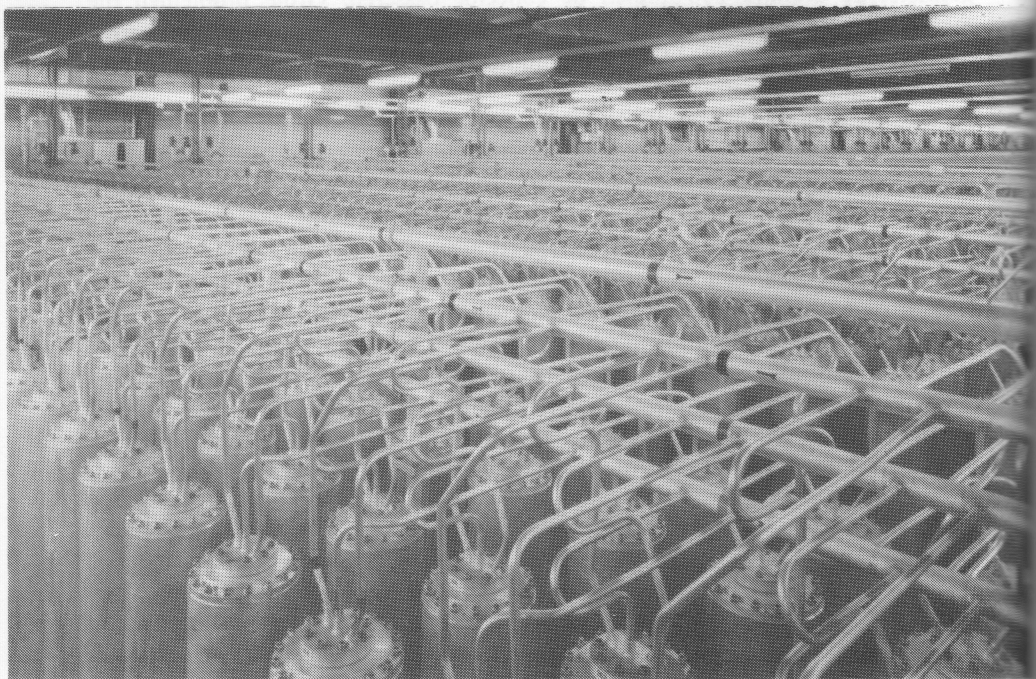
Luchtfoto UCN-fabriek in Almelo

stane ionen kunnen worden opgevangen door middel van elektrische of magnetische velden, waarna het verrijkte produkt wordt neergeslagen, terwijl de niet geëxciteerde uranium-238-atomen de collector passeren. Grote problemen die moeten worden opgelost hangen samen met het in stand houden van het laserbedrijf, het opwekken van voldoende uraniumdamp en het opschalen van het gehele proces tot industriële afmetingen.
De tweede lasermethode bestaat hierin, dat uranium-hexafluoridedamp gemengd met een dragergas bij zeer lage temperatuur wordt bestraald met twee verschillende lasers, een infra-rode en een ultraviolette. Gebruik wordt gemaakt van een isotopeneffect in de vibratieniveaus van het UF_6-molecuul. Er zijn zes fundamentele vibratietoestanden en de excitatie-energieën liggen in het infra-rood. Van deze excitaties is er maar één met een zodanig groot verschil in werkzame doorsnede voor de twee isotopen, dat selectieve excitatie praktisch uitvoerbaar is. De hiervoor gebruikte laser heeft een golflengte van 16μm (= 0,016 mm). Dat moet dan echter wel bij zeer lage temperaturen plaatsvinden, omdat anders de breedte van de absorptielijn veel groter is dan de isotopenverschuiving. Door de excitatie uit te voeren bij 30 kelvin (K) worden de rotatieniveaus zodanig bezet, dat de isotopenverschuiving significant wordt ten opzichte van de bandbreedte van de aangeslagen niveaus. Deze afkoeling wordt teweeg gebracht door adiabatische expansie van een mengsel, dat UF_6 en helium bevat, met partiële drukken van 100 en 900 Torr. Een expansieverhouding van 20:1 kan daarbij een temperatuurverlaging van 300 K naar 30 K bewerkstelligen bij een einddruk van 2 Torr totaal. De moleculaire dichtheid van de geëxpandeerde straal is dan enkele keren 10^{16} per cm^3. In de volgende stap wordt het aangeslagen $^{235}UF_6$ -molecuul geïoniseerd met behulp van een ultra-violet laser. Een complicatie hierbij is dat de ionisatie niet erg gevoelig is voor isotopen-effecten, ook al gaat het ioniseren van aangeslagen moleculen gemakkelij-

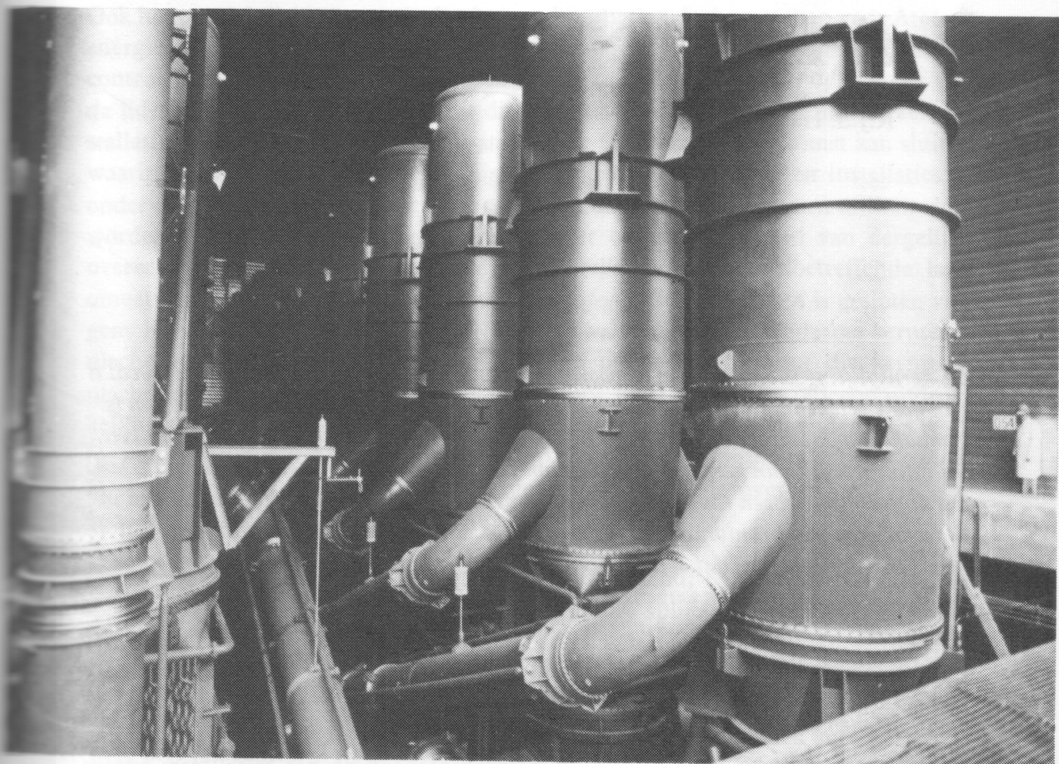


Figuur 5
Aanbod van scheidingsarbeid op de Westeuropese markt door de vier leveranciers (getrokken lijnen). De vraag die mag worden verwacht is aangegeven met stippen.

ker dan van niet-aangeslagen moleculen. Dat geldt ook voor de dissociatie die in de ionisatie-stap kan optreden. Er zal hierdoor ook een aanzienlijk deel van de $^{238}UF_6$-moleculen geïoniseerd en gedissocieerd raken. Afscheiding van het geïoniseerde molecuul geschiedt weer met behulp van een electro-magnetisch veld, waarna reactie met een geschikt reagens wordt uitgevoerd.
Er valt aan de lasermethode nog erg veel te ontwikkelen, en grootschalige toepassing lijkt nog ver verwijderd. Voor toepassing op kleine schaal zullen de mogelijkheden echter wel betrekkelijk snel ter beschikking staan.



 Overzicht van de SP3 cascadehal met ultracentrifuges van de UCN-fabriek in Almelo



Cascade van diffusoren in de verrijkingsfabriek van Tricastin

Verrijkingsmarkt

De verrijkingsmarkt die door de leveranciers, genoemd in tabel II en aangevuld met Urenco, moet worden beleverd, is door de stagnatie in de kernreactorbouw momenteel in een gedrukte stemming (zie ook hoofdstuk 23, figuur 5). In figuur 5 wordt de Westeuropese positie weergegeven. Pas als de reactorbouwprogramma's weer op gang komen zal de vraag naar verrijkingsarbeid weer gaan toenemen. Men moet verwachten dat een stijging van de vraag naar scheidingsarbeid pas na 1987 voelbaar zal worden.

Voor de gehele wereld ziet het plaatje van vraag en aanbod er niet veel beter uit. Ook hier geldt dat er eerst rond 1990 serieuze vraag zal zijn naar capaciteitsuitbreiding voor de scheidingsfabrieken. De VS verwachten hun eerstkomende uitbreiding (een centrifuge-verrijkingsfabriek) pas tegen 1992 in bedrijf te hebben.

Voor Urenco is de depressieve toestand van de markt uiteraard een tegenvaller. Urenco is echter, doordat het nu kosten-technisch gunstig zit ten opzichte van de gasdiffusie-verrijkers, en doordat het in staat is per afgesloten contract de benodigde extra-capaciteit bij te bouwen, in een relatief gunstige positie. Het huidige bouwprogramma loopt tot 1990, en verwacht wordt dat de veronderstelde opleving van de verrijkingsmarkt na 1987 een versnelling van het bouwprogramma zal toelaten.

Literatuur

S. Villani (Ed.), *Uranium Enrichment*, Springer Verlag, Berlin 1979.

8. SPLIJTSTOFBEWAKING

R.J.S. Harry

De kernsplijting is ontdekt aan de vooravond van de Tweede Wereldoorlog. Dit toeval is van grote betekenis geweest voor het aanvankelijke gebruik dat van deze energiebron is gemaakt, omdat de oorlog sterke prikkels gaf om een kernexplosief te ontwikkelen. Het militaire gebruik van kernenergie is daarom voorafgegaan aan het civiele gebruik. Deze ontwikkelingen hebben raakvlakken in de gemeenschappelijke grondstof uranium en in de technieken van uraniumverrijking en van opwerking van bestraald uranium. Wil men het risico beperken dat ooit (nog eens) kernwapens gebruikt worden, dan moet het aantal landen dat over die wapens beschikt beperkt worden gehouden. Het technisch middel daartoe ligt in de bewaking van splijtstof. Dit hoofdstuk behandelt de internationale richtlijnen, aanbevelingen en overeenkomsten inzake deze beveiliging. Het gaat hier om een internationaal geregelde controle op het vreedzaam gebruik van kernmateriaal, die men gescheiden moet zien van de fysieke beveiliging tegen diefstal en sabotage die ieder land apart wenselijk acht en toepast. Achtereenvolgens komen aan de orde doel, methoden, rapportage, insluiting, toezicht en onderzoek van de splijtstofbewaking.

Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt technische aspecten van de bewaking van splijtstof, die tot doel heeft een verdere verspreiding van het kernwapenbezit (proliferatie) tegen te gaan. In de bijdrage van P.H. Kooijmans (hoofdstuk 29) wordt nader ingegaan op de politieke en historische aspecten van de verdragen, waarin de staten die niet over kernwapens beschikken door het aanvaarden van een internationale controle op het civiele of vreedzame gebruik van de kernenergie ook daadwerkelijk aantonen geen misbruik van de aanwezige splijtstoffen te maken voor aanmaak van kernwapens of andere onbekende doeleinden. Hier vatten we samen welke verdragen dat zijn.

Voor de Europese Gemeenschappen is de controle geregeld in het op 25 maart 1957 te Rome gesloten 'verdrag tot oprichting van de Europese Gemeenschap voor Atoom-energie (Euratom)'. De doelstelling is om door het scheppen van de noodzakelijke voorwaarden bij te dragen tot een groei van de kernindustrie, en zodoende bij te dragen tot de verhoging van de levensstandaard in de lidstaten. Later is Euratom opgegaan in het grotere geheel van de Europese Gemeenschappen, zodat Euratom als zelfstandige instelling eigenlijk niet meer bestaat. Naast vele andere bepalingen kreeg Euratom het eigendomsrecht over alle splijtstof voor vreedzame doeleinden, en de dienst 'Veiligheidscontrole' kreeg de bevoegdheid het juiste gebruik van deze splijtstoffen te controleren. De Euratom-inspecteurs hebben te allen tijde toegang tot alle plaatsen, gegevens en personen die met de splijtstof werken.

De Verenigde Staten van Amerika accepteerden de internationale garantie die door de Euratom-inspecties op het vreedzaam gebruik van de splijtstof gegeven wordt als voldoende voorwaarde voor hun nucleaire leverantie-overeenkomsten met de Europese Gemeenschappen.

Ook het op 29 juli 1957 tot stand gekomen Internationale Agentschap voor Atoomenergie (IAEA) heeft als een van haar taken het uitvoeren van de internationale controle op het vreedzaam gebruik van de kernenergie (*safeguards*) op verzoek van de lidstaten. In de praktijk betekent dit, dat een staat die kernmateriaal of kerninstallaties levert met de ontvangende staat en de IAEA een overeenkomst kan sluiten waarin de IAEA de bevoegdheid krijgt de geleverde materialen en installaties te onderwerpen aan inspecties om vast te stellen dat deze niet voor een militair doel worden gebruikt. Op het ogenblik bestaan er ongeveer honderd van dergelijke overeenkomsten, die soms niet alle kerninstallaties in het desbetreffende land omvatten. Indien een overeenkomst over de *safeguards* van de IAEA is gesloten volgens het Non-Proliferatie Verdrag (NPV), dan vallen wel alle vreedzame kerntechnische activiteiten onder IAEA-controle. Een uitzondering vormt die kerntechnische activiteit, die niet in strijd is met het NPV, maar om andere redenen uitdrukkelijk is vrijgesteld van inspectie, bijvoorbeeld voor militaire doeleinden: een reactor voor voortstuwing van een oorlogsschip. Wel moet het militaire gebruik aan de IAEA meegedeeld worden. De eerder genoemde bilaterale overeenkomsten zijn, *voor zolang het NPV geldt,* niet meer van kracht.

De kernwapenstaten die het NPV hebben ondertekend, behalve de Sovjet-Unie, staan vrijwillig IAEA-controle op hun niet-militaire splijtstofgebruik toe, teneinde economische ongelijkheid weg te nemen. 114 staten hebben het NPV ondertekend. Door de unieke wereldwijde aanvaarding, via het NPV, van regelmatige inspecties op het grondgebied van de souvereine staten is een internationaal waarborgsysteem geschapen, dat pas volmaakt sluitend is als werkelijk alle landen met kerntechnische installaties aan dit verdrag deelnemen. Enkele nucleair belangrijke landen bieden nog steeds weerstand tegen de internationale druk om ook toe te treden. Niettemin vervult het NPV heden ten dage al een belangrijke rol in het streven om door het stelsel van internationale inspecties het vertrouwen tussen de staten omtrent hun vreedzaam gebruik van de kernenergie te verstevigen. Voor de Latijns-amerikaanse landen is het Verdrag van Tlatelolco van belang, waarbij het Latijns-amerikaanse continent een kernwapenvrije zône wordt, maar waarbij wel de ontwikkeling van kernexplosieven voor vreedzame doeleinden, zoals bijvoorbeeld het graven van kanalen of havens, theoretisch is toegestaan.

Externe beveiliging

Betekent het aanvaarden van internationale controle op zichzelf al een inbreuk op de souvereine rechten van de staten, de inspectie van een internationale organisatie op het systeem, dat dient om de splijtstoffen in de installaties en transporten die een rol spelen in de splijtstofkringloop te beveiligen tegen diefstal en sabotage, is helemaal niet aanvaardbaar voor de meeste staten. De IAEA heeft een aanbeveling voor de externe beveiliging laten opstellen door een groep experts op dat gebied. Deze aanbevelingen zijn door vrijwel alle landen in hun nationale systeem van beveiliging opgenomen. Ook in Nederland is dat het geval. Door het hanteren van deze richtlijnen wordt een bepaald niveau van beveiliging bereikt, dat ook als voorwaarde wordt verbonden aan leveranties van kernmaterialen en uitrusting door zeventien van de belangrijkste exportlanden (de *London Suppliers* en Australië en Finland).

De genoemde niveaus van de beveiliging zijn verder ook verbonden aan het Verdrag inzake de Physieke Beveiliging, die naar het voorbeeld van andere verdragen op het gebied van de internationale samenwerking in geval van terroristische acties tot stand komen is om onder meer een betere garantie te geven dat internationaal transport van kernmaterialen voortdurend voldoende beveiligd is. Aan de totstandkoming van dit verdrag is ook van Nederlandse zijde een actieve bijdrage geleverd, bijvoorbeeld doordat de technische paragrafen tot stand kwamen in een technische

werkgroep onder leiding van een Nederlandse voorzitter, die tevens vice-voorzitter van de algemene vergaderingen was. De tekst van het verdrag is op 28 oktober 1979 definitief vastgelegd en op 1 juli 1981 was zij reeds door eenendertig landen en de Commissie van de Europese Gemeenschappen ondertekend. Twee staten hebben het verdrag al geratificeerd.
Welke gedetailleerde maatregelen genomen worden voor de externe beveiliging van de splijtstofcyclus, kan met het oog op de gewenste veiligheid uiteraard beter verzwegen worden. De eerder genoemde richtlijnen zijn wel openlijk gepubliceerd. Met het feit dat deze richtlijnen door zoveel landen zijn aanvaard en met de Conventie, die ook het internationale transport onder dezelfde niveaus van beveiliging stelt, is ook dit mogelijke proliferatierisico op internationaal aanvaardbare wijze beveiligd.
In het volgende zal nog uitsluitend ingegaan worden op het aspect van de splijtstofbewaking dat in het Engels wordt aangeduid met *safeguards*, dat wil zeggen: door internationale controle vaststellen dat het kernmateriaal vreedzaam gebruikt wordt. Dit moet men duidelijk gescheiden zien van de beveiliging tegen diefstal en sabotage (*physical protection*), welke een beveiliging vooràf is, die gezien zijn verwantschap met bijvoorbeeld politietaken géén onderwerp voor internationale inspecties is.

Doel van de safeguardsinspecties

Naast de eerder genoemde Euratom-inspecties, die zeer ruim en veelomvattend zijn, is het doel van de IAEA-splijtstofbewaking (*safeguards*) technisch meer beperkt omschreven als: 'het tijdig vaststellen van een onttrekking uit het vreedzaam gebruik van een significante hoeveelheid splijtstof, en het eventueel afschrikken van de onttrekker door het risico van een vroegtijdige ontdekking.'
Voor het definiëren van de significante hoeveelheden van de splijtstoffen gaat men uit van de hoeveelheid splijtstof die vermoedelijk nodig is voor het maken van een kernexplosief. Daarvoor heeft de IAEA gebruik gemaakt van adviezen van specialisten, van wie ook enkelen uit kernwapenstaten afkomstig waren.
Hoewel voor het maken van een kernexplosief een behoorlijke hoeveelheid geavanceerde technologie nodig is, is deze laatste vrij, of via militair onderzoekwerk vrij eenvoudig op te bouwen. In het algemeen ontbreekt slechts één fundamentele grondstof, namelijk de splijtstof. Het is daarom dat men in de uitwerking van de voorwaarden van het NPV besloten heeft de controle te concentreren op deze splijtstof. Als richtlijn voor de inspecties worden de in de tabel vermelde hoeveelheden splijtstof gehanteerd. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen materialen die vrij eenvoudig en snel omgezet kunnen worden tot een kern voor een kernexplosief, en materialen die niet direct gebruikt kunnen worden. Hoewel van uranium, dat een verrijkingsgraad beneden 20% heeft, algemeen wordt aangenomen dat men daarmee geen kern voor een kernwapen kan maken, is dat niet helemaal zeker. Zij die over de kernwapentechnologie beschikken willen niet laten weten wat precies wèl en niet kan; vandaar dat ook voor 10% de theoretische getallen in de tabel vermeld zijn.
Indirect gebruik van splijtstof voor het maken van een kernexplosief betekent dat het materiaal eerst gebruikt wordt om door bestraling in een reactor plutonium te vormen, dat dan via opwerking beschikbaar komt; of als andere mogelijkheid dat het uranium extra verrijkt wordt. Opwerking en verrijking worden daarom tot de 'gevoelige' technologie gerekend; deze fabrieken verdienen speciale aandacht voor de splijtstofbewaking. Voor de niet-kernwapenstaten die tot het NPV zijn toegetreden zou deze wapenmateriaalfabricage in een geheime opwerkings- of verrijkingsfabriek moeten gebeuren, hetgeen een flagrante en daarom onwaarschijnlijke schending van het NPV is.

Voor het definiëren van het woord tijdig in het inspectiedoel, gaat men uit van de tijd die nodig is om de materialen om te zetten tot de kern van een kernexplosief. Voor afgescheiden en zuivere, direct te gebruiken materialen ligt deze tijd in de orde van dagen tot enkele weken; voor de indirect te gebruiken materialen wordt de termijn langer. Voor bestraalde splijtstof waaruit plutonium afgescheiden kan worden ligt zij in de orde van één tot drie maanden, en voor laag-verrijkt uranium of voor thorium denkt men zelfs aan een termijn van minstens een jaar om het hele proces van bestraling, opwerking en zuivering te doorlopen.

Minimum hoeveelheden splijtstof nodig voor een kernexplosief

			isotoop	totaal element
direct te gebruiken materialen	^{233}U		8 kg	8 kg
	^{239}Pu		8 kg	8 kg
	^{235}U(zuiver)		25 kg	25 kg
	verrijkingsgraad:	50%	25 kg	50 kg
		20%	50 kg	250 kg
	indien mogelijk:	10%	100 kg	1.000 kg
		< 10%	onmogelijk direct te gebruiken	
indirect te gebruiken materialen	^{235}U			
	verrijkingsgraad:	< 20%	75 kg	
	Th		20 ton	20 ton

De vaststelling van een facility attachment

Voordat de splijtstofbewaking op een installatie uitgeoefend kan worden, moeten de inspectie-autoriteiten van Euratom en de IAEA op de hoogte gesteld worden van de technische kenmerken van de bedrijfsvoering. Het is uiteraard vanzelfsprekend dat de bedrijfsleider een gedetailleerde kennis heeft van alle aspecten van zijn bedrijf, teneinde een veilige en doelmatige bedrijfsvoering te garanderen en om een geschikt boekhoudsysteem van kerntechnisch materiaal op te zetten. In het algemeen is de informatie die de bedrijfsleiding hiervoor nodig heeft veel gedetailleerder dan de informatie die voor de splijtstofbewaking nodig is. Verder zullen tot de kennis van de bedrijfsleider een aantal technische details behoren die fabrieksgeheim zijn.

De splijtstofbewakingsautoriteiten behoeven alleen over die kennis van het bedrijf te beschikken die nodig is om hun taak te kunnen uitvoeren. Deze informatie wordt van de bedrijfsleiding gevraagd in de vorm van 'constructiegegevens voor de technische bijlagen' op basis van hiervoor vastgestelde vragenlijsten.

De vereiste informatie omvat onder meer:

a. een identificatie van de installatie;

b. de algemene indeling van de installatie, waarbij ook de vorm, plaats en verplaatsingen van het kerntechnisch materiaal vermeld dienen te worden;

c. karakteristieken van de materiaalboekhouding, insluiting en toezicht;

d. bestaande en voorgestelde procedures voor boekhouding en controle op het kerntechnisch materiaal, indeling in materiaalbalansgebieden, metingen van het materiaal en de procedures voor het opmaken van een daadwerkelijke inventaris.

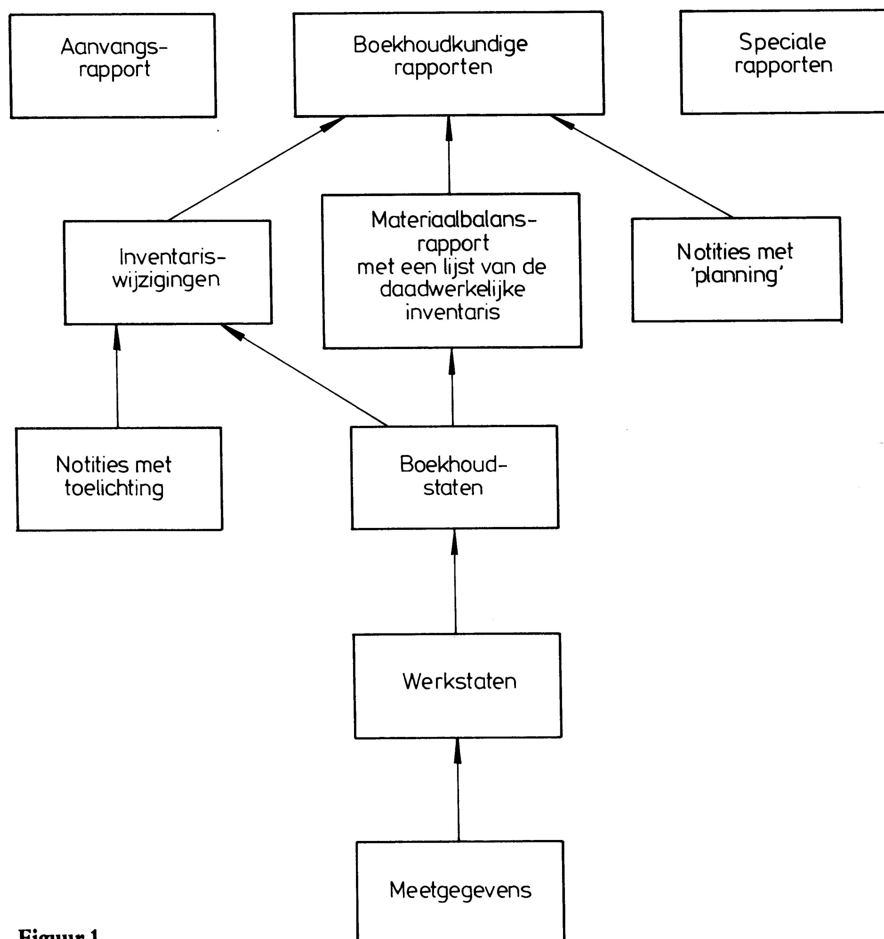
Het splijtstofbewakingssysteem vereist het instellen van een aantal materiaalbalansgebieden, die zodanig zijn gedefinieerd dat èn de inventaris èn de materiaalstromen in en uit dit gebied bepaald kunnen worden. Soms zullen deze gebieden kunnen samenvallen met de door de bedrijfsleiding ingestelde materiaalbeheersgebieden, soms zal het mogelijk zijn een aantal van deze gebieden tot één mate-

riaalbalansgebied te combineren. In het algemeen zal het dus mogelijk zijn dat de splijtstofbewakingsautoriteiten gebruik maken van de bestaande structuren. De extra eisen die hier door de splijtstofbewaking gesteld worden zijn minimaal en bestaan voornamelijk uit het samenvoegen van bepaalde onderdelen van de bestaande structuren.

Op basis van de ingediende informatie wordt via één of meer inspecties de juistheid van deze informatie vastgesteld. Ook worden de precieze regels voor verdere inspecties en rapportage door het desbetreffende bedrijf vastgelegd in een zogenaamde *Facility Attachment*. Dit document wordt door de betrokken staat goedgekeurd. Het omvat onder meer de indeling in materiaalbalansgebieden en de sleutelmeetpunten waar de inspecteurs de materiaalstromen en inventarissen kunnen verifiëren. Ook de toe te passen maatregelen van insluiting en toezicht zijn in de *Facility Attachment* vastgelegd.

Het rapportagesysteem

De resultaten van de metingen aan de splijtstof en vele andere informatie die nodig is voor de bedrijfsvoering, worden op werkstaten vastgelegd. Deze werkstaten vormen een basis voor de informatiehiërarchie in het bedrijf en voor de splijtstofbewaking, waarvan het splijtstofbewakingsdeel in figuur 1 schematisch is weergegeven.



Figuur 1
Hiërarchie van de informatie in het bedrijf zoals deze ten grondslag ligt aan de rapporten die ingestuurd moeten worden.

Het aanvangsrapport dient om de hoeveelheid kerntechnisch materiaal bij het in werking treden van de overeenkomst te specificeren. De speciale rapporten worden ingediend wanneer er ongebruikelijke voorvallen te melden zijn, waarbij splijtbaar materiaal verloren is gegaan. De boekhoudkundige rapporten omvatten:

- de regelmatig in te dienen inventaris-wijzigingsrapporten, zo nodig vergezeld van een notitie met toelichting;
- de materiaalbalansrapporten: daarbij hoort een lijst van de daadwerkelijke inventaris, waarin alle partijen kerntechnisch materiaal vermeld staan;
- notities die relevante mededelingen doen over toekomstige werkzaamheden, zoals bijvoorbeeld de datum waarop de volgende inventarisatie zal plaatsvinden.

In het bedrijf zullen aan de voorgaande rapporten boekhoudstaten ten grondslag liggen, die weer uittreksels zijn van de werkstaten. In deze laatste documenten staan de belangrijkste meetgegevens vermeld. De rapporten, die in het algemeen maandelijks aan de splijtstofbewakingsautoriteiten moeten worden uitgebracht, bevatten de gegevens die in de normale boekhouding van het bedrijf aanwezig zijn.
Het systeem van boekhouding van het kerntechnisch materiaal voor de bedrijfsvoering zal ook een mechanisme hebben om te garanderen dat de voorgeschreven procedures doelmatig worden uitgevoerd. De controle kan variëren van een controle op de boeken tot een volledig onafhankelijk systeem van verificaties. Welke methoden toegepast zullen worden, hangt af van de desbetreffende organisatie en is een zaak van interne doelmatigheid voor het bedrijf. In de splijtstofbewaking voeren de inspecteurs ook een dergelijke controle uit. Deze omvat de volgende punten:

a. verifiëren of de rapporten die aan de splijtstofbewakingsautoriteiten zijn overgelegd overeenstemmen met de gestelde eisen;
b. vaststellen dat en verifiëren of er veranderingen in de technische situatie zijn opgetreden;
c. verifiëren of de overgelegde rapporten overeenstemmen met de werkstaten in het bedrijf;
d. vaststellen dat en verifiëren of het aan splijtstofbewaking onderworpen kerntechnische materiaal aanwezig is en overeenstemt met de opgegeven specificaties van soort, hoeveelheid en samenstelling;
e. verifiëren van de informatie die is gegeven over de mogelijke oorzaken van optredende verschillen.

De getallen in de boekhouding zijn gebaseerd op metingen. Bij de inspectie doet de inspecteur andere metingen, die natuurlijk wel dezelfde hoeveelheid betreffen, maar mogelijk kleine afwijkingen ten opzichte van de eerdere metingen zullen aangeven. Deze verschillen wijzen niet direct op het 'verdwijnen' of weer 'verschijnen' van geheimzinnige hoeveelheden materiaal. Binnen bepaalde bekende grenzen zijn deze variaties toegestaan. Men noemt dit onboekbaar materiaal, of met een Engelse term: MUF (*Material Unaccounted For*).
In een opwerkingsfabriek wordt bijvoorbeeld achter een dikke betonnen afscherming de bestraalde splijtstof gezuiverd van het kernsplijtingsafval. Kilometerslange pijpleidingen bevinden zich binnen de afgeschermde ruimte, waar niemand bij kan komen vanwege het hoge stralingsniveau. Het kan gebeuren dat zich een dun laagje splijtstof afzet tegen de binnenkant van deze leidingen. In een later stadium lost dit materiaal weer op en komt dan weer binnen het bereik van de mensen en inspecties. Zulke hoeveelheden noemen we de 'verborgen inventaris', welke ook een onderdeel van het MUF is. Door de eerder beschreven maatregelen van voortdurende inspecties rondom de installatie weet men zeker dat er geen materiaal naar buiten is gegaan.
Tenslotte moet nog opgemerkt worden, dat kleine hoeveelheden splijtstof als verlies verdwijnen in de afvalstromen. Het kernsplijtingsafval van de opwerking bevat bijvoorbeeld een zeer kleine fractie splijtstof, die moeilijk precies gemeten kan worden. Daardoor treedt een extra onzekerheid op in de boekhouding. Het mate-

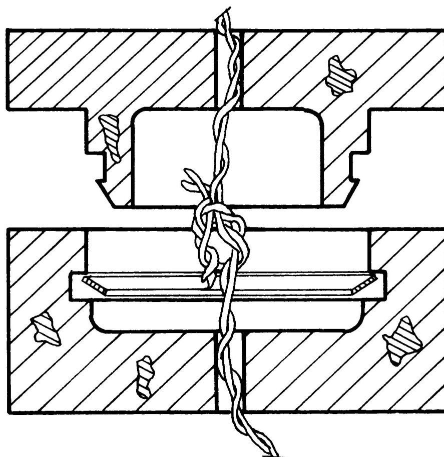
riaal is echter in het kernsplijtingsafval volkomen onbereikbaar en niet meer te gebruiken. Aanvullende splijtstofbewakingsmaatregelen, zoals continu toezicht, verzegeling van 'ontoegankelijke' ruimten en dergelijke, garanderen dat de aanwezige splijtstoffen niet onopgemerkt onttrokken kunnen worden.
Teneinde de inspectietaken te kunnen uitvoeren worden de inspecteurs in staat gesteld om
a. alle van belang zijnde werkstaten te raadplegen;
b. onafhankelijke metingen te doen aan het kerntechnisch materiaal;
c. de werking en de ijkingen van de meetinstrumenten te verifiëren;
d. maatregelen van toezicht en insluiting toe te passen en te gebruiken;
e. toezicht te houden op metingen en het nemen van monsters;
f. duplicaatmonsters te verkrijgen voor onafhankelijke analyses.
De inspecties door de splijtstofbewakingsautoriteiten zullen normaal op een routinebasis worden uitgevoerd, maar er zullen ook voorzieningen worden getroffen voor *ad hoc* inspecties met slechts een minimum aan kennisgeving vooraf aan de bedrijfsleiding of de desbetreffende staat.

Insluiting en toezicht

Het doel van de splijtstofbewaking is vast te stellen of geen significante hoeveelheden kerntechnisch materiaal aan hun vreedzame bestemming zijn onttrokken. Daarvoor zijn de getallen in de boekhouding zonder meer niet voldoende; zij moeten door de inspecteurs geverifieerd kunnen worden. Vaak kan dit door een aantal metingen te laten herhalen, of door monsters te nemen. Soms is dit praktisch niet mogelijk, zoals bijvoorbeeld bij splijtstofelementen.
In de splijtstofelementen is het kerntechnische materiaal voor enkele jaren ingesloten, namelijk van het moment van fabricage tot het moment van opwerking. Als de inspecteur bij de fabricage vaststelt, dat de juiste hoeveelheid materiaal in het element is geplaatst, kan hij gedurende de 'levensduur' van het element volstaan met vast te stellen dat identiteit en integriteit niet zijn aangetast. Ook als kerntechnisch materiaal in andere omhullingen is ingesloten, zoals bijvoorbeeld een kluis, een reactorvat of een afvalvat, zijn kwalitatieve maatregelen van insluiting en toezicht voldoende om de vereiste zekerheid te geven dat geen onttrekking heeft plaatsgevonden.
Voor de splijtstofbewaking zijn verschillende mogelijkheden onderzocht om een zegel aan te brengen. Voor een verzegeling van korte duur kan men volstaan met bijvoorbeeld het opplakken van een etiket met een moeilijk na te maken handtekening, en een zekere weerstand tegen losweken, losscheuren en uitwissen van de opschriften. Voor verzegelingen die gedurende langere tijd zekerheid moeten geven is in het laboratorium van de Europese Gemeenschappen, vestiging Ispra, een nieuw zegel ontwikkeld. Evenals bij de verzegeling die bijvoorbeeld op de elektriciteitsmeter is toegepast wordt gebruik gemaakt van een getwijnde draad, in dit geval echter van twee metalen met verschillende smeltpunten. Na het breken is het niet meer mogelijk deze draad 'onzichtbaar' te repareren. De draad wordt onder het zegel samengebonden.

In figuur 2 is een tekening gegeven van één uitvoering van dit Isprazegel. Het is een soort drukknoop, die zo ontworpen is dat hij wel dicht, maar niet meer open kan zonder te breken. Het unieke van dit zegel schuilt in de insluitingen van een zwaarder materiaal die toevallig verdeeld zijn in het materiaal van het zegel. Hierdoor heeft ieder zegel zijn eigen unieke en niet na te maken identiteit. Met een vrij kleine opstelling, die de inspecteur kan meenemen, kan de verdeling van deze insluitsels ultrasoon worden opgemeten. Zo stelt hij eenvoudig vast of de verzegeling nog intact is.

Figuur 2
Doorsnede van een zegel, zoals door het laboratorium in Ispra ontwikkeld. Door de schuine veerring is openen zonder breuk onmogelijk. De insluitsels kunnen ultrasoon gemeten worden. Zij geven een unieke informatie over identiteit en integriteit.



Voor splijtstofelementen van kokendwaterreactoren is een modificatie van dit zegel gemaakt. Eén deel van de drukknoop wordt gevormd door het zegel; het andere deel, het knopje, wordt gevormd door het speciaal bewerkte uiteinde van een *tie-rod* van het element. Omdat dergelijke staven het element bijeenhouden is demontage alleen mogelijk na verwijdering van het zegel. Verschillende bestralingsexperimenten met deze zegels zijn met goed gevolg uitgevoerd.
Voor materiaalbeproevingsreactoren zoals de Hoge-Flux Reactor (HFR) te Petten is een modificatie van het zegel ontworpen en beproefd. Nadat een experiment op kleine schaal naar tevredenheid verlopen was, zijn nu onder verantwoordelijkheid van de splijtstofbewakingsautoriteiten alle elementen van deze reactor verzegeld. Ook voor andere reactortypen worden verzegelingen van de splijtstofelementen ontworpen en beproefd.
Ook worden thans vaak televisiecamera's en videorecorders of filmcamera's gebruikt om bijvoorbeeld bij reactoren vast te stellen dat er geen splijtstofwisselingen buiten aanwezigheid van de inspecteurs hebben plaatsgevonden.

Onderzoek en ontwikkelingswerk voor de splijtstofbewaking

Het gaat er niet alleen om de splijtstofbewaking effectief en efficiënt uit te voeren, deze moet ook tot objectieve en kwantificeerbare uitspraken leiden. Wat dit laatste betreft zijn nog vele verbeteringen mogelijk, terwijl ook de schaalvergroting in de kerntechniek, in het bijzonder ten aanzien van de 'gevoelige' technieken (opwerking, mengoxyde-splijtstofelementenfabricage en verrijking) specifieke problemen stelt.
Op het gebied van de splijtstofbewaking bestaat er een gecoördineerd onderzoek- en ontwikkelingsprogramma van ESARDA (*European Safeguards Research and Development Association*). In deze associatie werken de Commissie van de Europese Gemeenschappen en de nationale onderzoekinstellingen samen om door middel van op elkaar afgestemde programma's bij te dragen aan de verbetering van de splijtstofbewaking. Ook het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) doet hieraan mee. Het onderzoek- en ontwikkelingswerk van het ECN bestrijkt verschillende kanten van de splijtstofbewaking, zoals isotopencorrelaties, niet-destructieve meetmethoden en chemische analyses. Ook wordt gewerkt aan de systeemanalyse, die zowel de kwantificering van de beschikbare boekhoudgegevens en de inspectieresultaten tot statistisch verantwoorde uitspraken omvat als optimaliseringsstudies van dat proces.

Isotopencorrelaties

De bestraling van de splijtstof in een reactor gaat gepaard met een aantal veranderingen in de isotopensamenstelling van de splijtstoffen, zowel als van de gevormde splijtingsprodukten. Deze veranderingen geschieden volgens bepaalde wetmatigheden, zodat na afloop van de bestraling aan de isotopensamenstellingen bepaalde relevante gegevens afgelezen kunnen worden. Een veel aangehaald voorbeeld is de verhouding tussen plutonium (*Pu*) en uranium (*U*), die afgelezen kan worden aan de verhouding van de splijtingsproduktisotopen caesium-137 en caesium-134. Deze laatste verhouding kan niet-destructief gemeten worden uit de gammastraling die het bestraalde splijtstofelement uitzendt.

ECN levert bijdragen aan het onderzoek naar de bruikbaarheid van de isotopencorrelaties voor de splijtstofbewaking in de vorm van mathematische procedures en programma's voor de ESARDA-data-bank, waarin de beschikbare gegevens uit verschillende landen voor nader onderzoek worden opgeslagen.
Ook chemische analyses van monsters uit de opwerkingsfabriek staan op het programma. Dit gebeurt in het kader van een internationaal experiment ICE (*Isotope Correlation Experiment*). Tenslotte kunnen ook resultaten uit het bij ECN verrichte nabestralingsonderzoek een nuttige bijdrage voor de eerder genoemde databank opleveren.

Chemische analyses

De klassieke methoden om nauwkeurig de hoeveelheden splijtstof te bepalen behoren tot de chemische analyse. Voor de bepalingen van de hoeveelheden uranium en plutonium in de te onderzoeken monsters zijn bij het ECN methoden ontwikkeld die met zeer kleine monsterhoeveelheden (in de orde van 25 mg) kunnen volstaan. Het onderzoek- en ontwikkelingswerk richt zich thans op het verbeteren van de nauwkeurigheid en precisie van 0,05% die nu bereikt wordt tot een waarde van 0,01 tot 0,02%.
Voor het meten van de isotopensamenstelling van uranium en plutonium wordt gewerkt met massaspectrometers, waaraan fundamenteel onderzoek gedaan wordt, terwijl voor het meten van de hoeveelheid uranium en plutonium in bestraalde splijtstof gebruik gemaakt wordt van de nauwkeurige massaspectrometrie, via de isotopenverdunningstechniek. Hier kunnen thans monsters van minder dan 10 microgram voor gebruikt worden. De nauwkeurigheid en precisie ligt rond 1%.

Al deze chemische technieken hebben het nadeel dat er een lange tijd verstrijkt tussen het nemen van het monster en het bekend worden van het resultaat, voornamelijk veroorzaakt door de problemen die aan het transport van de kleine monsterhoeveelheden verbonden zijn. Het is dan ook zaak om de meer indirecte niet-destructieve technieken, die op de plaats van de monsterneming snel en direct uitgevoerd kunnen worden, zo snel mogelijk tot een aanvaardbaar niveau van nauwkeurigheid te brengen.

Niet-destructieve analyses

Omdat de splijtstofbewakingsinspecteur onafhankelijke metingen moet doen met een minimum aan inbreuk op de normale bedrijfsvoering, gaat de voorkeur uit naar niet-destructieve meetmethoden. Ook de mogelijkheid een meting te herhalen is een aantrekkelijk aspect. De ECN-activiteiten richten zich voornamelijk op de toepassing van gammaspectrometrie. Voor de meting van de verhouding van verschillende gamma-emitterende nucliden in een object is een methode ontwikkeld waarbij geen externe standaarden nodig zijn (de 'intrinsieke calibratie'). Het principe berust op het feit dat indien één nuclide fotonen van verschillende energie uit-

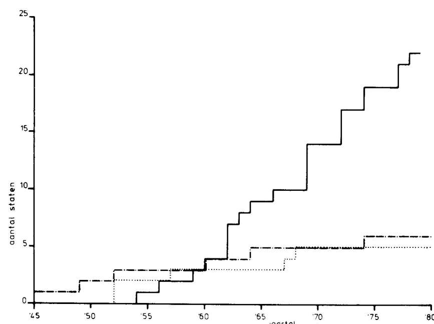
zendt, de aantallen geëmitteerde fotonen van de verschillende energieën altijd in een vaste verhouding staan. Dat betekent, dat men voor de specifieke omstandigheden van die meting uit deze verhoudingen het relatieve detectierendement als functie van de energie kan bepalen. Daarmee kan men dan ook de relatieve intensiteit van de andere gammafotonen bepalen, dus de activiteitsverhouding van de verschillende nucliden.
Om aan te tonen dat in de verrijkingsfabriek te Almelo uitsluitend laag-verrijkt uranium wordt geproduceerd, is een niet-destructieve meetmethode toegepast.

Vergelijkend onderzoek
Medewerking wordt verleend aan internationale programma's om te komen tot standaarden, zowel in de vorm van procedures als in de vorm van referentiematerialen, voor de niet-destructieve technieken. Het deelnemen aan internationale vergelijkende studies heeft bijgedragen tot het bepalen van de mogelijkheden van de toegepaste technieken en de bepaling van eigen kunnen ten opzichte van de andere laboratoria.
Enkele belangrijke experimenten zijn:
IDA '72: tweeëntwintig laboratoria deden mee in dit experiment, waarbij identieke monsters werden geanalyseerd en uiteindelijk een aantal verbeteringen konden worden aangegeven voor de toegepaste isotopenverdunningstechniek; dit experiment wordt nu als IDA '80 herhaald met een groter aantal laboratoria, inclusief enkele in Oostbloklanden.
AS '76: een vergelijkende studie van zesentwintig laboratoria op het gebied van de alfaspectrometrie. Naast massaspectrometrie geeft deze meetmethode een betrouwbare aanwijzing voor het gehalte van plutonium-238 in een monster.
SALE: een regelmatig voortgaand programma van analyses aan goed gekarakteriseerde monsters om de kwaliteit van de deelnemende laboratoria te evalueren (*Safeguards Analytical Laboratory Evaluation*).
In een internationaal vergelijkend onderzoek zijn de verhouding van de plutoniumisotopen in goed gedefinieerde standaarden bepaald uit de gammaspectra die zowel door ECN als andere instituten werden gemeten.

De specifieke en variërende omstandigheden van een onderzoekinstelling zoals het ECN en de splijtstofboekhouding voor de Hoge-Flux Reactor van het Gemeenschappelijk Onderzoek Centrum van de Commissie van de Europese Gemeenschappen hebben bijgedragen tot een brede ervaring met de praktische aspecten van de splijtstofbewaking. De verkregen technische kennis en ervaring op het gebied van de splijtstofbewaking wordt weer benut bij het ondersteunen en verlenen van advies aan de Nederlandse overheid en het bedrijfsleven. Ook worden adviezen gegeven aan de Commissie van Europese Gemeenschappen en het Internationale Agentschap voor Atoomenergie (IAEA) te Wenen.
Voor de gevoelige technologieën van opwerking en verrijking zijn ten behoeve van de splijtstofbewaking speciale internationale projectwerkgroepen in het leven geroepen, waarin de inspectie-autoriteiten en specialisten uit de landen die over deze technologieën beschikken samenwerken om tot een spoedige oplossing te komen van de problemen die zich nu en in de toekomst zullen voordoen, wanneer grotere installaties in gebruik genomen gaan worden.

Conclusie
De ongeveer vijfhonderd installaties, die onder splijtstofbewaking vallen, bevatten tezamen ongeveer 80 ton plutonium, 10 ton hoog-verrijkt uranium en 30.000 ton lager-verrijkt uranium. Door de maandelijkse rapportage is precies bekend waar al deze splijtstof zich bevindt. Niet alleen wordt bij een inspectie de boekhouding gecontroleerd, ook kan de inspecteur onafhankelijke metingen doen, monsters

nemen, bepaalde vaten of opslagruimten of delen van de installatie verzegelen, en met behulp van foto-, film- of televisiecamera's en registratie-apparatuur gedurende zijn afwezigheid regelmatig de situatie laten vastleggen. Dit betekent bijvoorbeeld dat het onmogelijk wordt dat uit een reactor splijtstofelementen worden verwijderd zonder dat dit geregistreerd wordt, hoewel de inspecteur slechts enkele malen per jaar op bezoek komt.
Internationale inspecties kunnen nooit met 100% zekerheid voorkomen dat er splijtstof voor onbekende doeleinden wordt gebruikt. Wel geven deze inspecties de best mogelijke garantie (met bijna 100% zekerheid) dat splijtstofonttrekkingen tijdig ontdekt zullen worden. Met een staf van nog geen honderd inspecteurs worden door het IAEA ongeveer duizend inspecties per jaar uitgevoerd. Daarbij werden tot nu toe per jaar ongeveer 200 anomalieën gevonden, die bij nader onderzoek alle een 'onschuldige' oorzaak bleken te hebben. De kosten van deze inspecties bedragen ongeveer 20 miljoen dollar per jaar; dat is ongeveer evenveel als één militair vliegtuig kost.
Ondanks bepaalde tekortkomingen die thans verbeterd worden (gebrek aan medewerkers en instrumenten) is er een betrouwbaar en geloofwaardig systeem van splijtstofbewaking opgebouwd. De directeur-generaal van het IAEA, Sigvard Eklund, kon dan ook in mei 1981 op het derde ESARDA-symposium over splijtstofbewaking verklaren, dat 'het kernmateriaal dat onder IAEA-splijtstofbewaking valt in de vreedzame splijtstofkringloop bleef, of op andere manier adequaat werd verantwoord' (dit laatste slaat bijvoorbeeld op kleine hoeveelheden die als afval werden afgeschreven). Niettemin kunnen we hier volledigheidshalve nog vermelden welke mogelijkheden voor sancties er bestaan.
Wanneer een Euratom-inspecteur vaststelt dat kerntechnisch materiaal verdwenen is, kan de Commissie van de Europese Gemeenschappen verschillende maatregelen nemen, variërend van een waarschuwing tot het terughalen van alle splijtstoffen en het onder toezicht stellen van de desbetreffende onderneming.
Als een IAEA-inspecteur een onttrekking constateert, wordt de betrokken staat gesommeerd het geconstateerde verschil aannemelijk te maken. Indien dat niet kan wordt de zaak aan de Verenigde Naties gerapporteerd. Op grond van het handvest van de VN kunnen dan sancties getroffen worden die, wanneer de wereldvrede dat noodzaakt, zelfs met lucht-, zee- en landstrijdkrachten kunnen worden uitgevoerd.
Op hetzelfde ESARDA-symposium werd door de directeur van het Euratom *Safeguards Directorate*, H.W. Schleicher, duidelijk aangegeven op welke wijze en op welke punten het splijtstofbewakingssysteem met de steun van het onderzoek- en ontwikkelingswerk van vele laboratoria in de wereld verbeterd kan worden. Zolang deze werkzaamheden goed uitgevoerd worden is er geen enkele reden te geloven dat de verdere verspreiding van het vreedzame gebruik van de kernenergie tot verspreiding van kernwapenbezit zal leiden, mits de splijtstofbewaking effectief wordt toegepast op de gehele splijtstofkringloop.
Hoe er politiek gewerkt wordt om ook de enkele landen, die nog niet tot het NPV zijn toegetreden, tot toetreding te bewegen, is onderwerp van een andere bijdrage.



Figuur 3
Is er een verband tussen kerncentrales en kernwapens? Deze grafiek geeft het aantal staten dat beschikt over:
–·–·– splijtingsexplosieven
·········· waterstofbommen
——— kerncentrales
als functie van de tijd

Literatuur

Wapenfeiten 1977, Gegevens over bewapening, ontwapening en militaire uitgaven gebaseerd op het SIPRI-Jaarboek 1977, NIVV-reeks 11, Nederlands Instituut voor Vredesvraagstukken, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1977.

J. van Ginkel, H.J. Neuman en C.J. Visser, *Kernenergie en Kernwapens,* NIVV-reeks 12, Nederlands Instituut voor Vredesvraagstukken, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1977.

Toetsingsconferentie van de Partijen bij het Verdrag inzake de Niet-verspreiding van Kernwapens, Ministerie van Buitenlandse Zaken 114, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1976.

A. Meerburg, Het tegengaan van de verspreiding van kernwapens met hulp van een inherent veilige splijtstofcyclus, *Internationale Spectator 31* (1977), blz. 238.

La Non-Prolifération et les Garanties Internationales, International Atomic Energy Agency, Wenen 1978 (ook in het Engels, Spaans en Russisch).

O. Marwah en A. Schulz, *Nuclear Proliferation and the Near-Nucleair Countries,* Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1975.

R.J.S. Harry, Splijtstofbewaking, *Atoomenergie en haar toepassingen 17* (1975), blz. 36.

M. Willrich and T. Taylor, *Nuclear Theft: Risks and Safeguards,* Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts 1974.

Proliferation and the Safeguarding of the Peaceful Application of Nuclear Power, Symposium op 8 december 1976 te 's-Gravenhage, Verslag uitgegeven door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Kerntechniek.

Verordening (Euratom) nr. 3227/76 van de Commissie van 19 oktober 1976 houdende toepassing van de bepalingen inzake de veiligheidscontrole van Euratom, *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen 19* (1976), 31 december 1976.

Tweede Kamer der Staten Generaal, Zitting 1977-1978, Aanhangsel, blz. 501-502, Vragen van het lid Jansen (PPR) over materiaalbalansen bij het gebruik van kernenergie (ingezonden 5 oktober 1977).

P. Mostert en P. van der Hulst, Proliferatiegevaar en kernenergie, *Energiespectrum 3* (1979), blz. 38.

Ir. S. Rozendaal, *Kernsplijting, omstreden energie,* NRC-Handelsblad, Kortschrift 11, Rotterdam 1978, blz. 22.

G. Hough, T. Shea, and D. Tolchenkov, Technical criteria for application of IAEA safeguards, *International Safeguards Technology 1978,* IAEA-SM-231/112, Wenen 1978.

International Atomic Energy Agency Bulletin, Volume 22, nr. 3/4, International Atomic Energy Agency, Wenen 1980.

9. KWEEKREACTOREN

G.A. de Boer

De thans gangbare splijtingsreactoren halen lang niet alle energie uit de uraniumkernen die daar feitelijk in ligt opgeslagen. Natuurlijk uranium bestaat voor het leeuwendeel uit isotopen met het gewicht 238, die moeilijk splijtbaar zijn. Deze isotopen kunnen echter door de vangst van een neutron worden omgezet in isotopen met het gewicht 239. Na emissie van twee elektronen vormen ze gemakkelijk splijtbare isotopen van plutonium. In de gangbare kernreactoren worden dergelijke kernen al gevormd en vervolgens verspleten. Een reactor kan echter zodanig ingericht worden, dat er evenveel van die kernen uit natuurlijk uranium worden gekweekt, of zelfs meer, als er worden verspleten. Dergelijke kweekreactoren kunnen ruim vijftig maal meer energie uit het uranium halen dan de thans gangbare splijtingsreactoren en doorbreken aldus de beperking van de uraniumvoorraden. Uranium wordt zo een eindeloze energiebron. Deze reactoren zijn momenteel in ontwikkeling en zullen naar verwachting tegen de eeuwwisseling economisch renderen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het ontwerp en de werking van kweekreactoren, met bijzondere aandacht voor hun veiligheid.

De betekenis van de kweekreactor voor de energieverzorging op lange termijn

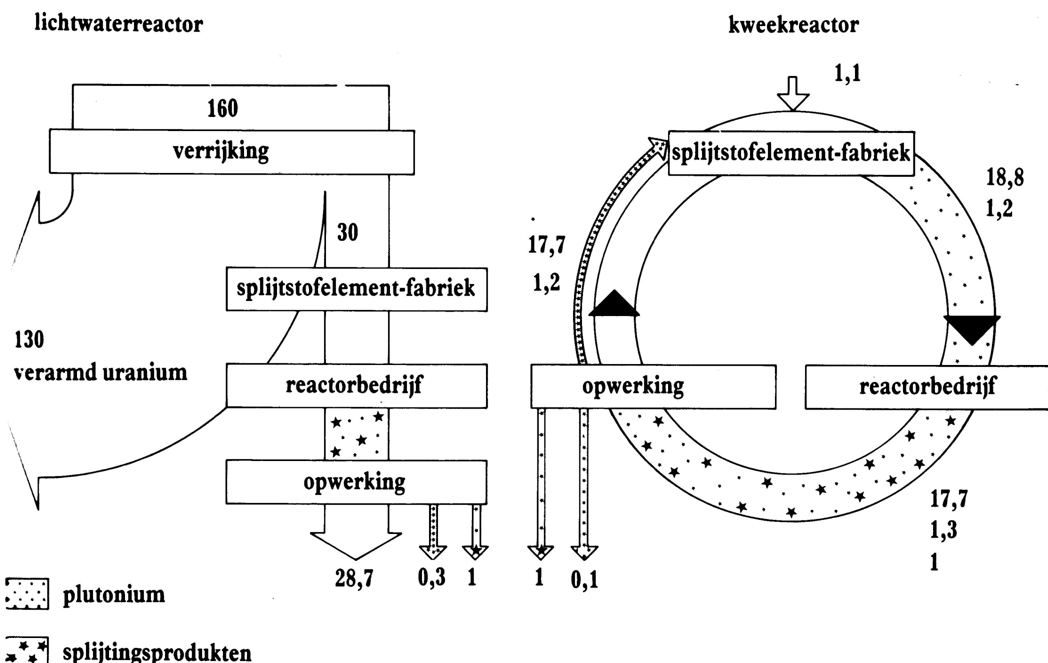
Een kweekreactor is een reactorinstallatie waarin met behulp van kernsplijtingsprocessen energie – nucleaire warmte – wordt ontwikkeld, die via verschillende stappen in elektrische stroom wordt omgezet. Omdat kerncentrales met lichtwaterreactoren nu al op een rendabele manier stroom opwekken, moet de vraag beantwoord worden of kweekreactoren, dus kernreactoren van een andere constructie, nog nodig zijn voor stroomopwekking. In het hiernavolgende zal de betekenis van kweekreactoren voor de energiehuishouding toegelicht worden, in het bijzonder in vergelijking met lichtwaterreactoren.

Vergelijking tussen lichtwaterreactoren en kweekreactoren

In figuur 1 zijn de jaarlijks benodigde hoeveelheden splijtstof voor een lichtwaterreactor en voor een kweekreactor naast elkaar gesteld. De getallen hebben steeds betrekking op het bedrijf van een 1.000 MW(e)-installatie gedurende één jaar met 80% lastfactor, dat wil zeggen 7.000 uur per jaar vollastbedrijf.

Splijtstofbalans van een kweekreactor

De splijtstofbalans van een kweekreactor ziet er geheel anders uit dan die van een lichtwaterreactor: hier is het materiaal, dat bij de kernsplijting gebruikt wordt, plutonium. De splijtstof plutonium wordt weliswaar door de splijtingsprocessen verbruikt, maar tegelijkertijd door het kweekproces uit uranium-238 weer opnieuw geproduceerd: het ontstaan van plutonium kan worden vergeleken met het oprijzen van de vogel Phoenix uit de as. Dit is de reden waarom de Fransen hun eerste grote kweekreactor-installatie in Marcoule ook Phénix hebben genoemd. In totaal blijft de hoeveelheid plutonium niet alleen behouden, zij neemt bij bedrijf van de



Figuur 1
Jaarlijkse hoeveelheid splijtstof voor lichtwaterreactoren en kweekreactoren in tonnen per jaar voor een 1.000 MW(e)-centrale met een belasting van 80%

---

reactor zelfs toe. De splijtstof die uiteindelijk in de kweekreactor 'verbrand' wordt, is het uranium-238.

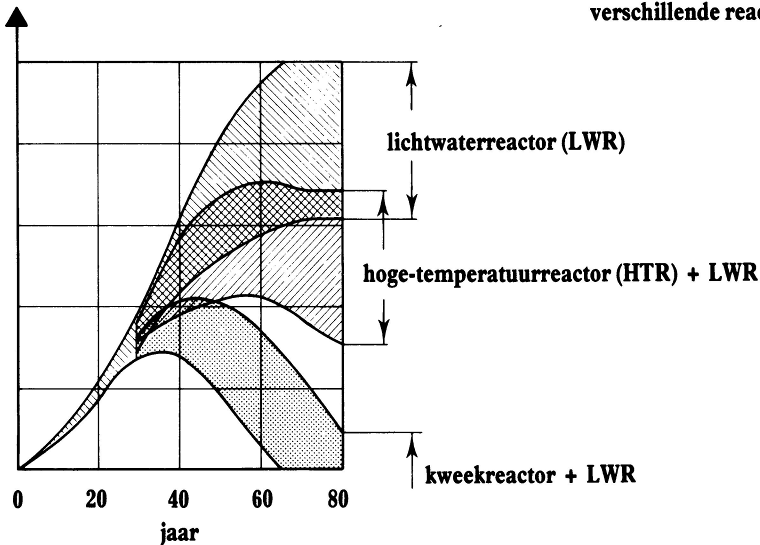
Vereenvoudigd uitgedrukt: de lichtwaterreactor verbrandt het uranium-235 en de kweekreactor het uranium-238 uit het natuurlijk uranium.

Voor het gebruik van uranium-238 in de kweekreactor moet aan twee eisen voldaan zijn. Er moet plutonium beschikbaar zijn; juister gezegd, voor het in bedrijf stellen van een kweekreactor is een bepaalde beginhoeveelheid plutonium noodzakelijk, die bijvoorbeeld van lichtwaterreactoren afkomstig kan zijn. Hieruit volgt, tenminste in het begin, een gemeenschappelijke strategie van de toepassing van lichtwaterreactoren en kweekreactoren.

De kweekreactor heeft een gesloten splijtstofkringloop nodig, wat betekent, dat de opwerking een integraal bestanddeel van het bedrijf van de kweekreactoren is. Dit maakt het mogelijk, verbruikt plutonium door nieuw geproduceerd plutonium te vervangen.

In figuur 1 is deze gesloten splijtstofkringloop van een kweekreactor afgebeeld. Voor de fabricage van de splijtstofelementen zijn per jaar 18,8 ton uranium-238 en 1,2 ton plutonium nodig, die in de reactor verbruikt worden.

Na het versplijten in de reactor bevatten de splijtstofelementen nog 17,7 ton uranium-238, 1,3 ton plutonium en opnieuw ca. 1 ton splijtingsprodukten. Bij de opwerking worden deze bestanddelen gescheiden: splijtingsprodukten en het gekweekte extra plutonium worden uit de kringloop verwijderd. Om de massabalans te doen kloppen, moet bij de splijtstofelementfabricage 1,1 ton uranium-238 aangevuld worden. Dit uranium kan bijvoorbeeld verarmd uranium uit de verrijkingsinstallatie van de lichtwaterreactoren zijn. Ook hieruit blijkt, dat het logisch is, lichtwaterreactoren en kweekreactoren in combinatie toe te passen. (Bij alle in figuur 1 opgegeven getallen is geen rekening gehouden met verliezen in de splijtstofkringloop.)



Figuur 2
Jaarlijkse uraniumbehoefte bij verschillende reactorstrategieën

Vergelijking van het verbruik aan natuurlijk uranium bij uiteenlopende reactorstrategieën

Figuur 2 toont schematisch hoe het verschillende splijtstofgebruik van enkele reactortypen op de lange duur het jaarlijkse verbruik van natuurlijk uranium in een kernenergie-economie beïnvloedt. Hierbij is uitgegaan van een behoefte aan kernenergie, die eerst gelijkmatig stijgt, na ongeveer dertig tot veertig jaar afvlakt om na ongeveer zeventig jaar een verzadigingswaarde te bereiken.

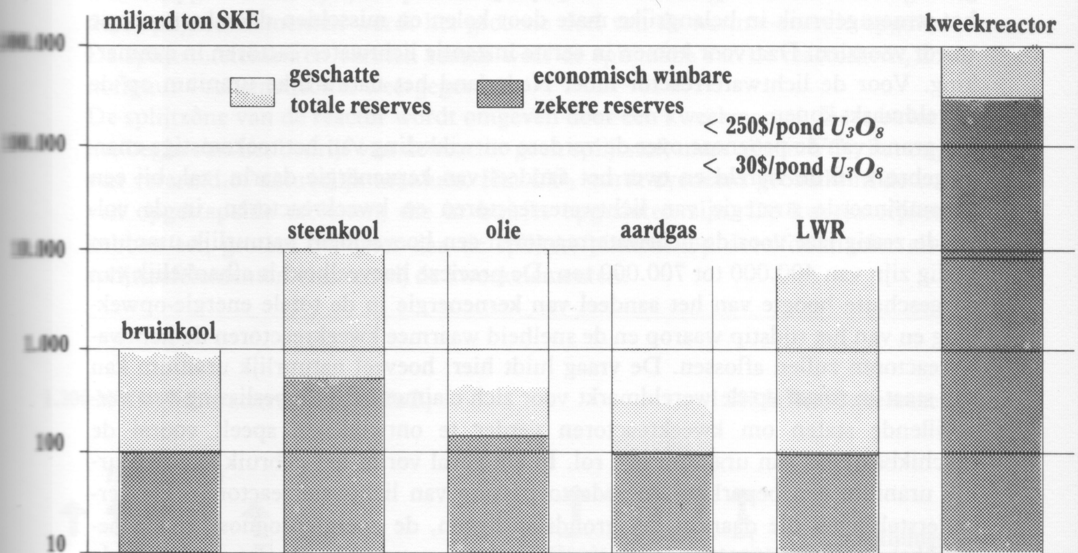
Bij een zuivere lichtwaterreactorstrategie (bovenste band) neemt de jaarlijkse behoefte aan natuurlijk uranium evenredig toe met de behoefte aan kernenergie. De bovenste begrenzing stelt het geval zonder opwerking voor. De onderste begrenzing stelt het geval voor met opwerking en volledig nieuw toepassen van plutonium en resterend uranium.

Bij de gecombineerde strategie van lichtwaterreactoren (onderste band) neemt eerst de lichtwaterreactor de nucleaire energie-opwekking op zich. Vanaf een bepaald tijdstip worden kweekreactoren toegepast. Ze worden bijgebouwd naar gelang plutonium beschikbaar komt en lossen zo in toenemende mate de lichtwaterreactoren af. Door de toepassing van kweekreactoren loopt de jaarlijkse behoefte aan natuurlijk uranium terug en verdwijnt tenslotte geheel. Vanaf dat ogenblik laat deze strategie het toe, uitsluitend het afval-uranium van de lichtwaterreactoren (uranium-238) als splijtstof te gebruiken, en wel gedurende vele eeuwen.

Uit de vergelijking van lichtwaterreactoren en kweekreactoren kan het volgende worden vastgesteld: de kweekreactor vergroot de hoeveelheid uranium-splijtstof. In de praktijk zestig maal zoveel als een lichtwaterreactor. De kweekreactor heeft geen verrijkt uranium nodig en is daardoor niet afhankelijk van verrijkingsinstallaties. Hij kan echter behalve natuurlijk uranium ook het in grote hoeveelheden beschikbare afval-uranium uit de verrijkingsinstallatie gebruiken en bereikt daardoor een praktisch volledige onafhankelijkheid in de splijtstofverzorging. Het bedrijven van een kweekreactor betekent, dat met grote hoeveelheden splijtstof, waarin plutonium aanwezig is, moet worden omgegaan (ongeveer vijfmaal meer dan bij de lichtwaterreactor). Deze extra inspanning wordt echter gecompenseerd door een bijna volledig wegvallen van winning en verwerking van uraniumerts.

Consequenties voor de energiehuishouding

Het energieverbruik van de wereld ligt nu bij 9 miljard ton steenkoolequivalent per jaar. Daarvan wordt ongeveer 20% voor stroomopwekking gebruikt. De vraag is: hoe zal het energieverbruik en vooral het stroomverbruik zich in de toekomst ontwikkelen? Prognoses, zoals bijvoorbeeld door het Internationale Agentschap voor Atoomenergie (IAEA) in 1977 in Salzburg werden voorgedragen, of de studie *Workshop on alternative energy strategies* van het Massachusetts Institute of Technology in de Verenigde Staten, noemen voor het jaar 2000 een geschatte wereldbehoefte aan energie van ongeveer 20 miljard ton steenkoolequivalent per jaar. Daarvan is, afhankelijk van de te volgen strategie, 2 tot 6 miljard ton het aandeel van de kernenergie, wat ongeveer overeenkomt met 700 tot 2.000 GW(e). Een groeiende behoefte aan kernenergie wordt daarbij niet alleen bepaald door de eventuele toeneming van het energieverbruik en door substitutieprocessen bij de energieopwekking in de hooggeïndustrialiseerde landen, maar ook door de noodzakelijke toeneming van het energieverbruik in de ontwikkelingslanden.
Welke energiereserves zijn nu op aarde aanwezig? In figuur 3 zijn de wereldreserves aan energie in de vorm van kolen, olie, gas en uranium afgebeeld, en wel voor wat betreft de categorie 'bekende, economisch winbare reserves', en ook voor de 'in totaal geschatte' reserves.



Figuur 3
Energiereserves op de aarde

Enkele getallen uit figuur 3 moeten hier nader worden toegelicht. De met zekerheid bekende en economisch winbare oliereserves bedragen ongeveer 150 miljard ton steenkoolequivalent (SKE). Ongeveer dezelfde hoeveelheid wordt als extra reserves nog aanwezig geschat. Aardgas en bruinkool vertonen soortgelijke waarden.
Van steenkool zijn de reserves hoger: 500 miljard ton in de categorie 'bekend en economisch winbaar' en bijna 10.000 miljard ton in de categorie 'in totaal aanwezig geschat'. De economisch aantrekkelijke uraniumvoorraden worden tegenwoordig op in totaal ongeveer 4 miljoen ton geschat, wat bij de toepassing in lichtwaterreactoren met inbegrip van opwerking en opnieuw toepassen van plutonium

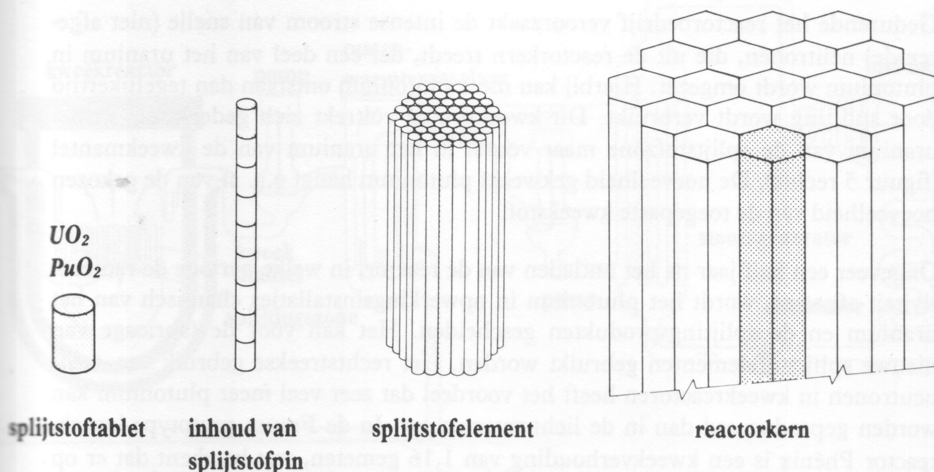
en resterend uranium ongeveer overeenkomt met 120 miljard ton SKE. Wanneer deze zelfde hoeveelheid ook in de kweekreactor gebruikt wordt, niet alternatief maar aanvullend, betekent dit ongeveer 8.000 miljard ton SKE. Uranium uit de eerstvolgende kostenklasse is eveneens economisch te gebruiken in de kweekreactor en levert waarden van ongeveer 200.000 miljard ton SKE. Een grens voor de economische toepassing van uranium in de kweekreactor is echter ook dan nog niet bereikt. De kweekreactor kan door de hoge benutting van het uranium nog bij zeer hoge uraniumkosten rendabel werken.
De boodschap van figuur 3 luidt: olie- en aardgasvoorraden, bruinkool, economisch winbare steenkool, evenals uranium in lichtwaterreactoren vormen wat betreft de energiereserves één klasse van brandstofvoorraden. De toepassing van uranium in kweekreactoren is een kwalitatief andere klasse. De totale voorraad steenkool laat zich niet zonder meer in de ene of in de andere klasse onderbrengen.
In Nederland bedraagt het energieverbruik tegenwoordig ongeveer 100 miljoen ton steenkoolequivalent per jaar (dat is 1% van het wereldenergieverbruik). Een verdere toeneming in de volgende tientallen jaren is te verwachten, ook al is het niet in dezelfde mate als in de wereld als geheel. Nederland bezit, behalve aardgas, slechts zeer kleine energiereserves. Aardgas wordt in Nederland voor het grootste deel gebruikt in huishoudens en voor stroomopwekking. De huidige aardgasproduktie ligt bij 60 miljoen ton steenkoolequivalent. Een verhoging van de produktie is niet zinvol. Binnenkort moet reeds een belangrijk deel van het aardgasgebruik gedekt worden door import. Het energieprogramma in Nederland houdt in, dat in het stroomgebruik in belangrijke mate door kolen en misschien door kernenergie wordt voorzien. Daarvoor komen in eerste instantie lichtwaterreactoren in aanmerking. Voor de lichtwaterreactor moet Nederland het natuurlijke uranium op de wereldmarkt kopen.
Op grond van de prognose over de verdere ontwikkeling van het toekomstige energiegebruik in de wereld en over het aandeel van kernenergie daarin, zal, bij een gecombineerde strategie van lichtwaterreactoren en kweekreactoren, in de volgende zestig jaar voor de lichtwaterreactoren een hoeveelheid natuurlijk uranium nodig zijn van 400.000 tot 700.000 ton. De precieze hoeveelheid is afhankelijk van de geschatte hoogte van het aandeel van kernenergie in de totale energie-opwekking en van het tijdstip waarop en de snelheid waarmee kweekreactoren de lichtwaterreactoren zullen aflossen. De vraag luidt hier: hoeveel natuurlijk uranium kan een staat in totaal op de wereldmarkt voor zich claimen? Bij de beslissing van verschillende staten om kweekreactoren verder te ontwikkelen speelt vooral de beschikbaarheid van uranium een rol. In elk geval vormt het gebruik van natuurlijk uranium een beperking voor de toepassing van lichtwaterreactoren. De veronderstellingen die daaraan ten grondslag liggen, de energieprognose en de beschikbare reserves aan natuurlijk uranium, kunnen veranderen; dat verandert de situatie dan alleen kwantitatief, maar niet kwalitatief.

Het technische concept van de kweekreactorcentrales

Kweekreactoren dienen gelijktijdig voor energieopwekking en voor de produktie van kernsplijtstof. In het navolgende worden de constructieprincipes en de stand van de ontwikkeling van de natrium-gekoelde kweekreactoren beschreven.

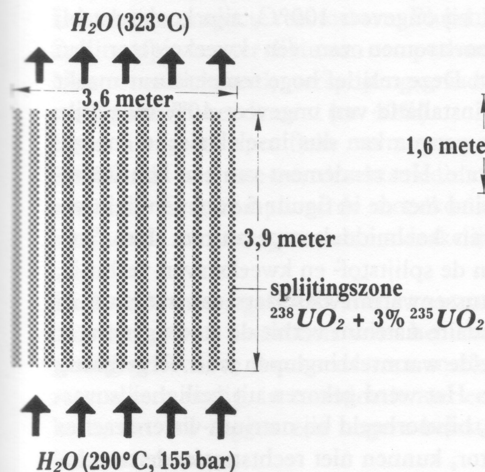
Energie-opwekking en kweekproces

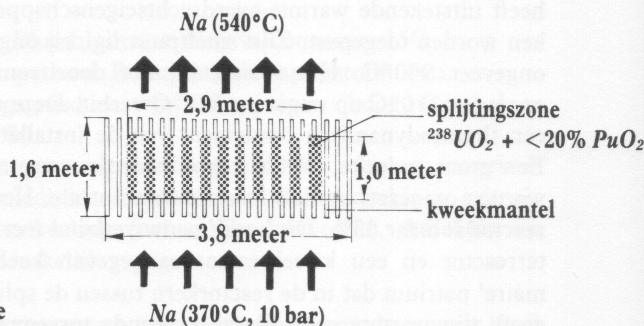
Kweekreactoren zijn evenals andere kerncentrales thermische centrales. Door beheerste kernsplijting in de splijtstof wordt warmte ontwikkeld, die door een warmte-overdrachtsmedium wordt afgevoerd, en voor het opwekken van stoom voor de turbo-generatoren wordt gebruikt. De splijtstof bestaat uit plutonium in de vorm van plutoniumdioxyde: PuO_2. Het is ongeveer in de verhouding 1:5 met uraniumdioxyde, UO_2, vermengd. Dit mengsel van oxyden wordt toegepast in de



Figuur 4
Schematische opbouw van een splijtstofelement voor een kweekreactor

vorm van tabletten, waarmee pinnen opgebouwd worden die ongeveer zo dik zijn als een potlood. Ze zijn opgesloten in zeer dunwandige buisjes van roestvrij staal. De zo opgebouwde splijtstofpinnen worden tot zeshoekige bundels verenigd. In deze splijtstofelementen wordt het grootste deel van de warmte-energie opgewekt. De splijtstofelementen vormen samen weer de splijtzône van de reactorkern, zoals in figuur 4 schematisch is weergegeven.
De splijtzône van de reactor wordt omgeven door een kweekmantel. Deze bevat bij het begin van het bedrijf van de reactor geen splijtstof, maar alleen UO_2, het oxyde van verarmd of natuurlijk uranium. Het UO_2 wordt eveneens gebruikt in de vorm van opgestapelde tabletten, die in buisjes opgesloten zijn. De kweekstofpinnen hebben een grotere diameter dan de splijtstofpinnen. Op dezelfde manier als de splijtstofelementen vormen zij de kweekelementen.





Figuur 5
Reactorkernen in doorsnede

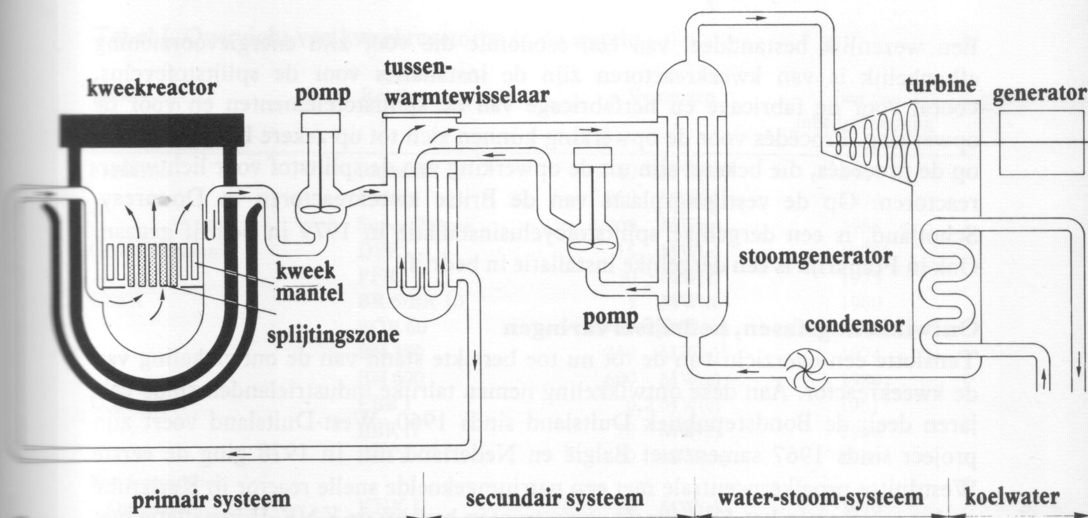
Gedurende het reactorbedrijf veroorzaakt de intense stroom van snelle (niet afgeremde) neutronen, die uit de reactorkern treedt, dat een deel van het uranium in plutonium wordt omgezet. Hierbij kan meer plutonium ontstaan dan tegelijkertijd door splijting wordt verbruikt. Dit kweekproces voltrekt zich gedeeltelijk in het uranium van de splijtstofzône maar vooral in het uranium van de kweekmantel (figuur 5 rechts). De hoeveelheid gekweekt plutonium hangt o.a. af van de gekozen hoeveelheid van de toegepaste kweekstof.

Ongeveer een half jaar na het ontladen van de reactor, in welke periode de radioactiviteit afneemt, wordt het plutonium in opwerkingsinstallaties chemisch van het uranium en de splijtingsprodukten gescheiden. Het kan voor de fabricage van nieuwe splijtstofelementen gebruikt worden. Het rechtstreekse gebruik van *snelle* neutronen in kweekreactoren heeft het voordeel dat zeer veel meer plutonium kan worden geproduceerd dan in de lichtwaterreactor. In de Franse prototype-kweekreactor Phénix is een kweekverhouding van 1,16 gemeten, wat betekent dat er op iedere 100 gespleten plutoniumkernen ongeveer 116 nieuwe bij komen. Door een veranderde opbouw van de reactorkern met oxydische splijtstof of door overgang op carbidische splijtstof kunnen, naar verwacht wordt, kweekverhoudingen tot ongeveer 1,3 bereikt worden. Ook kan een kweekverhouding van 1 ingesteld worden, zodat precies zoveel splijtstof geproduceerd als verbruikt wordt.
Snelle neutronen hebben echter het nadeel dat ze de splijting van een plutoniumkern met een aanmerkelijk kleinere waarschijnlijkheid tot stand brengen dan de afgeremde neutronen van gebruikelijke reactoren. De snelle neutronen vliegen als het ware aan de plutoniumkernen voorbij. Ter compensatie heeft men een zeer veel hogere concentratie aan splijtbare kernen dan bij de lichtwaterreactor. Figuur 5 toont in langsdoorsnede de verschillen in grootte tussen de kernen van lichtwater- en kweekreactoren voor centrales met het zelfde elektrische vermogen. Het vermogen dat per volume-eenheid in de splijtstofzône ontwikkeld wordt, is bij een kweekreactor drie tot vijf maal hoger dan bij een lichtwaterreactor.

Warmte-overdracht

Het hoge specifieke vermogen in een kweekreactorkern moet door een geschikt warmte-overdrachtsmedium uit de reactor naar de stoomgeneratoren worden afgevoerd. In bijna alle tot nu toe in de wereld gebouwde snelle reactoren wordt als warmte-overdrachtsmedium (koelmiddel) vloeibaar natrium gebruikt. Natrium heeft uitstekende warmte-overdrachtseigenschappen en kan bij lage bedrijfsdrukken worden toegepast. Zijn smeltpunt ligt bij ongeveer 100°C, zijn kookpunt bij ongeveer 900°C. Het wordt, bij het doorstromen van een kweekreactor van ongeveer 370°C op ongeveer 540°C verhit. Deze relatief hoge temperatuur maakt een thermodynamisch rendement van de installatie van ongeveer 40% mogelijk. Een groot gedeelte van de geproduceerde warmte kan dus in elektrische energie worden omgezet, evenals in een kolencentrale. Het rendement van een lichtwaterreactor is maar 33%. Dit houdt nauw verband met de in figuur 5 voor een lichtwaterreactor en een kweekreactor aangegeven koelmiddeltemperaturen. Het 'primaire' natrium dat in de reactorkern tussen de splijtstof- en kweekstaven verhit is, geeft zijn warmte eerst via zogenaamde tussenwarmtewisselaars aan natrium in secundaire kringlopen af, en pas het secundaire natrium verhit de stoomgenerator (figuur 6). Dit concept met tussengeschakelde warmtekringlopen is in vergelijking met een lichtwaterreactor gecompliceerder. Het werd gekozen uit veiligheidsoverwegingen. Storingen in de stoomgenerator, bijvoorbeeld bij natrium-water-reacties als gevolg van lekkage in een stoomgenerator, kunnen niet rechtstreeks de reactorkern beïnvloeden. Het door de stoomgenerator stromende natrium is, in tegenstelling tot het primaire natrium, niet radioactief.

 Het in figuur 6 voor de 'kringloop'-bouwwijze getoonde warmteoverdrachts-



Figuur 6
Warmte-overdrachtssysteem van een kweekreactor

systeem is in kweekreactorcentrales in parallelle systemen meervoudig aanwezig, zodat ook bij uitval van één van de systemen de vervalwarmte uit de reactorkern veilig kan worden afgevoerd. De 300 MW(e)-kerncentrale Kalkar, die nu in aanbouw is, met de natriumgekoelde prototype-kweekreactor SNR-300 heeft bijvoorbeeld drie parallelle warmte-overdrachtssystemen, die uit veiligheidsoverwegingen ruimtelijk van elkaar gescheiden zijn.

Samenvatting van de technische karakteristieken

De essentiële eigenschappen, die een natriumgekoelde kweekreactor in tegenstelling tot een lichtwaterrector bezit, zijn hieronder samengevat.

Voornaamste eigenschap: geen moderator, daardoor snelle neutronen (energie groter dan 0,1 MeV) voor de produktie van energie en plutonium. Kweekverhoudingen van 1,3 bereikbaar.
In verband met de geringe effectieve doorsnede van snelle neutronen: grote dichtheid van de splijtstof.
Daardoor: compacte reactorkern. Plutoniumverrijking van ongeveer 15%.
Splijtstofpinnen ter dikte van een potlood. Roestvaststalen splijtstofhulzen.
Neutronendichtheid, versplijtingsgraad en temperatuurniveau hoog. Goed thermodynamisch rendement (ca. 40%).
Door het grote specifieke vermogen: natrium met een kookpunt van ongeveer 900°C als warmte-overdrachtsmedium. Daardoor een bijna drukloos primair systeem. Ongecompliceerde noodkoeling (natuurlijke convectie). Afdekgas en secundaire natriumsystemen noodzakelijk.

De kweekreactor gebruikt snelle neutronen, werkt dus zonder moderator en heeft daardoor meer neutronen voor het kweekproces beschikbaar. Vanwege de zeer geringe effectieve doorsnede voor snelle neutronen heeft men een meer compacte reactorkern nodig, in combinatie met een grote vermogensdichtheid in de reactorkern, dat wil zeggen een hogere belasting van de splijtstofelementen dan bij de lichtwaterreactor.
De hoge waarde van de neutronendichtheid, van de temperaturen en van de nagestreefde versplijtingsgraad van de splijtstof stellen bijzondere eisen aan de splijtstofelementen, en vooral aan het materiaal van de splijtstofstaven.

Een wezenlijk bestanddeel van een economie die voor zijn energievoorziening afhankelijk is van kweekreactoren zijn de installaties voor de splijtstofcyclus, vooral voor de fabricage en herfabricage van de splijtstofelementen en voor de opwerking. Procédés voor de opwerking kunnen zich tot op zekere hoogte baseren op de procédés, die bekend zijn uit de opwerking van de splijtstof voor lichtwater-reactoren. Op de vestigingsplaats van de Britse kweekreactoren in Dounreay, Schotland, is een dergelijke splijtstofcyclusinstallatie in 1979 in bedrijf gegaan. Ook in Frankrijk is een dergelijke installatie in bedrijf.

Ontwikkelingsfasen, bedrijfservaringen
Tenslotte een overzicht van de tot nu toe bereikte stand van de ontwikkeling van de kweekreactor. Aan deze ontwikkeling nemen talrijke industrielanden sinds vele jaren deel; de Bondsrepubliek Duitsland sinds 1960. West-Duitsland voert zijn project sinds 1967 samen met België en Nederland uit. In 1978 ging de eerste Westduitse proefkerncentrale met een natriumgekoelde snelle reactor in Karlsruhe op het terrein van het *Kernforschungszentrum* in bedrijf: de KNK-II-installatie met 20 MW elektrisch vermogen. Deze installatie heeft na verscheidene veranderingen een centrale kernzône met een snel neutronenspectrum gekregen, en zal in de toekomst vooral gebruikt worden voor de beproeving van splijtstofelementen voor kweekreactoren, van componenten voor natriumkringlopen en van de instrumentatie.
In 1973 is in Kalkar de bouw begonnen van de reeds genoemde prototype-kweekreactorcentrale van 300 MW elektrisch vermogen. Volgens de huidige plannen zal de overdracht aan de bedrijver van de installatie in 1985 plaatsvinden. In de Sovjet-Unie, Engeland en Frankrijk wekken prototypen van deze orde van grootte, maar met een iets ander constructieprincipe, reeds sinds enige jaren energie op. Algemeen tonen de tot nu toe verkregen bedrijfservaringen met de prototypen aan, dat natriumgekoelde kweekreactoren technisch realiseerbaar zijn.
Moeilijkheden zijn in de laatste jaren bijna uitsluitend buiten de reactorkern in het niet-nucleaire gedeelte van de installatie, vooral in de natrium/natrium-tussen-warmtewisselaars en de stoomgeneratoren opgetreden. Van deze moeilijkheden is aangetoond, dat ze te overwinnen zijn. De ervaring leert dat storingen bij het bedrijf van centrales in hoge mate vermeden kunnen worden, wanneer men de grote componenten vóórdat zij in bedrijf genomen worden eerst buiten de kerncentrales test. Hieraan leveren de grote industriële beproevingsinstallaties, bijvoorbeeld in Bensberg bij Keulen en in Hengelo essentiële bijdragen. Hier worden zulke componenten op ware grootte tijdens duurproeven met natrium getest. Deze beproevingen hebben bijvoorbeeld getoond, hoe belangrijk strenge kwaliteitscontrole voor de duizenden lasnaden aan stoomgeneratoren is, opdat natrium-water-reacties vermeden worden.

In de Sovjet-Unie en in Frankrijk zijn op dit ogenblik niet alleen prototype-installaties in gebruik, maar zijn bovendien demonstratie-kweekreactorcentrales van respectievelijk 600 en 1.200 MW(e) in bedrijf en in aanbouw. De Franse demonstratie-kweekreactorcentrale Super Phénix met 1.200 MW(e) vermogen is gemeenschappelijk door elektriciteitsmaatschappijen in Frankrijk, Italië, Duitsland, België en Nederland in opdracht gegeven, en sinds 1977/78 in aanbouw. In juli 1977 werden contracten afgesloten, die moeten leiden tot een verregaande integratie van de Duitse, Belgische, Nederlandse en Franse activiteiten op het gebied van de kweekreactor, zowel op het vlak van de nucleaire ontwikkelingscentra als dat van de industrie en de elektriciteitsmaatschappijen.
Met de prototype-kweekreactor Phénix heeft men in Frankrijk nu vijf jaar ervaring. Het is een elektriciteitscentrale met een vermogen van 250 MW. De ervaringen hebben bewezen dat het reactorontwerp aan alle te stellen eisen voldoet. De

Tabel I. Overzicht van kweekreactoren in de wereld

Land	Reactor	Vermogen	Jaar van inbedrijfneming
Frankrijk	Rapsodie	40 MW(th)[1]	1967
	Phénix	250 MW(e)[1]	1974
	Super Phénix	1.200 MW(e)	1983
Groot-Brittannië	DFR	15 MW(e)	1959[2]
	PFR	250 MW(e)	1975
USSR	BR-5/BR-10	5 MW(th)	1960
	BOR 60	45–60 MW(th)	1970
	BN 350	350 MW(e)[3]	1974
	BN 600	600 MW(e)	1980
USA	EBR I	0,2 MW(e)	1951[4]
	EBR II	20 MW(e)	1964
	FFTF	400 MW(th)	1980
Bondsrepubliek Duitsland	KNK II	20 MW(e)	1979
Bondsrepubliek/ België/Nederland	SNR 300	300 MW(e)	1985
Japan	Joyo	50 MW(th)[5]	1978
	Monju	300 MW(e)	1985

MW(th) = Megawatt thermisch vermogen
MW(e) = Megawatt elektrisch vermogen
[2] Stilgelegd: 1977
[3] Een deel van de opgewekte warmte wordt voor zeewaterontzouting gebruikt
[4] Stilgelegd: 1963
[5] Verhoging tot 100 MW(th) later voorzien

reactor is stabiel en zeer goed te regelen. De splijtstof voldoet zelfs zeer goed en het is mogelijk gebleken een kweekfactor van 1,16 te behalen. Natrium is een koelmiddel dat zeer goed voldoet en in de praktijk geen problemen oplevert. Er treedt namelijk zo goed als geen corrosie op en het koelmiddel vervuilt niet. Het stralingsniveau in het reactorgebouw is zeer laag gebleken, zodat de stralingsdosis die het personeel heeft ontvangen (gemiddeld 20 mrem per jaar) ver beneden de toelaatbare waarde (5.000 mrem per jaar) is gebleven. Ook de lozingen zijn ver beneden de toelaatbare waarden gebleven, waarbij opgemerkt moet worden dat er geen vloeibaar afval geloosd wordt. Het gasvormige afval bedroeg minder dan 0,2% van de vastgestelde limiet. Er zijn wel storingen geweest; daarbij is echter gebleken dat reparaties makkelijk kunnen worden uitgevoerd. Er werd een lager van een primaire natriumpomp vervangen en de zes warmtewisselaars werden alle gerepareerd. Bij één warmtewisselaar was een lek opgetreden waaruit bleek dat een bepaald constructie-onderdeel niet voldeed. Dit onderdeel is vervangen door een verbeterde constructie bij alle desbetreffende warmtewisselaars. Tijdens het uitvoeren van de reparatie had men ook de gelegenheid om andere constructiedetails te inspecteren. Daarbij bleek de verdere constructie goed voldaan te hebben en zeker nog dertig à veertig jaar mee te kunnen gaan.
Het is in de afgelopen vijf jaar gebleken dat de gemiddelde beschikbaarheid van de kweekreactor Phénix hoog is (65%) ondanks de reparatieperiode van een half jaar en dat ook het thermisch rendement goed is (42%).

De veiligheid van natriumgekoelde kweekreactoren, met als voorbeeld de 300 MW(e) prototype-kweekcentrale in Kalkar (SNR-300)

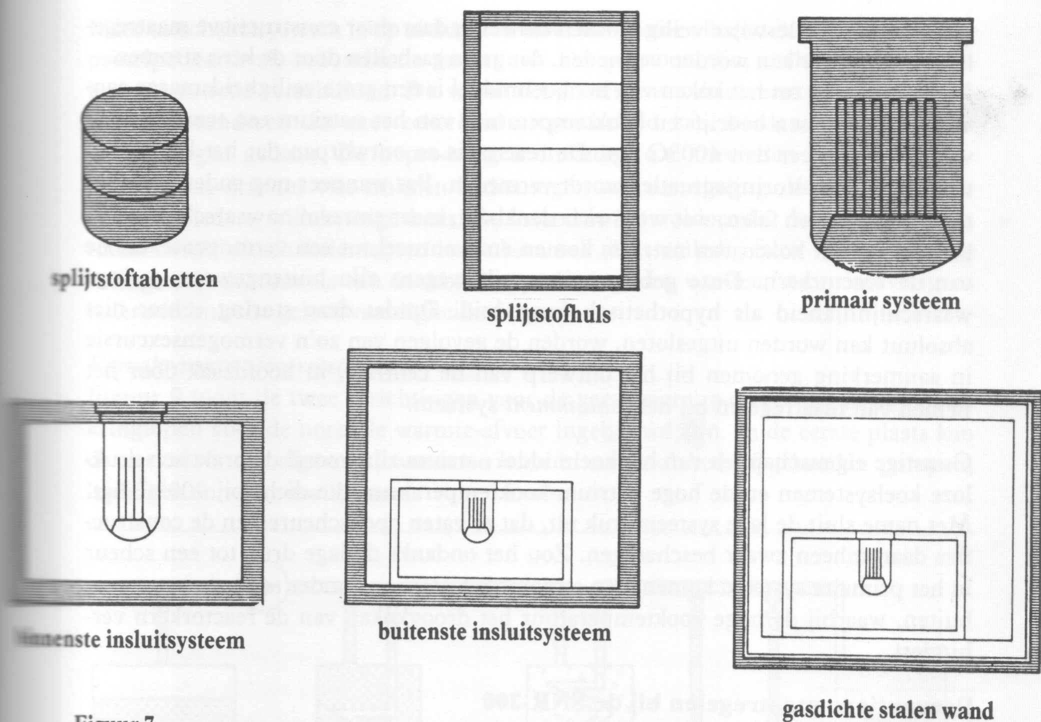
Bij het bedrijf van kernreactoren worden grote hoeveelheden radioactieve en chemisch giftige stoffen gevormd. Het ontsnappen, zelfs van geringe hoeveelheden van de inventaris aan radioactieve stoffen zou voor de omgeving een ernstig gevaar kunnen betekenen. Daarom moet een ongecontroleerd en ontoelaatbaar vrijkomen van splijtingsprodukten en andere radioactieve stoffen zoals bijvoorbeeld plutonium, onder alle omstandigheden worden verhinderd. Daarmee is de belangrijkste opgave voor het veiligheidstechnische ontwerp van kernreactoren vastgesteld.
Er moet worden verzekerd dat radioactieve stoffen die zich binnen in de reactor bevinden ook bij storingen in de centrale opgesloten blijven en noch op ongecontroleerde wijze, noch in ontoelaatbare hoeveelheden in de omgeving komen. Om aan deze eis te voldoen, wordt een in de techniek vaak toegepaste methode gebruikt: de inventaris aan radioactiviteit wordt door achter elkaar liggende barrières in de centrale opgesloten.

Het principe van de barrières

Het principe van de barrières wordt in figuur 7 aan het voorbeeld van de SNR-300 getoond. Splijtingsprodukten en actiniden (hier: de op uranium volgende radioactieve elementen, waaronder het plutonium) ontstaan in de kernsplijtstof, die zelf een aanmerkelijk vermogen bezit deze stoffen in zich op te sluiten. De kernsplijtstof is opgesloten in dichtgelaste splijtstofhulzen, die een eerste gasdichte barrière tegen het ontwijken van de radioactieve stoffen vormen. Een tweede, eveneens gasdichte barrière wordt gevormd door het reactorvat en het primaire koelsysteem, met inbegrip van het natrium dat zich daarin bevindt, dat een groot deel van de door eventuele lekken uit de kernsplijtstof in het natrium ontsnapte splijtingsprodukten chemisch bindt.
Verdere barrières zijn de ruimten van het binnenste en buitenste insluitsysteem (*containment*), dat zijn de betonnen wanden van het reactorgebouw, die een gasdichte voering van staalplaat hebben. Een laatste barrière wordt gevormd door de luchtspleet tussen de betonnen wand van het buitenste insluitsysteem en de gasdichte stalen wand die zich daarom heen bevindt. Ventilatoren die de lucht steeds afzuigen, handhaven in deze luchtspleet een zekere onderdruk.
Deze meervoudige barrières garanderen, dat noch bij normaal bedrijf, noch bij storingen ongecontroleerde of ontoelaatbare ontsnappingen van radioactiviteit mogelijk zijn. Om storingen te vermijden zijn bijzondere veiligheidsmaatregelen voorzien.

Veiligheidsmaatregelen kunnen in het algemeen in twee categorieën worden onderscheiden: *preventieve* maatregelen en *containment*-maatregelen, dat zijn maatregelen om radioactieve stoffen binnen de centrale op te sluiten.
Preventieve maatregelen zijn maatregelen en inrichtingen, die verhinderen dat een optredende bedrijfsstoring zich ontwikkelt tot een ernstiger storing en daardoor leidt tot het in gevaar brengen van een barrière. Daartoe moet vóór alles aan twee voorwaarden worden voldaan:
- de kettingreactie van de reactor moet altijd veilig en betrouwbaar uitgeschakeld kunnen worden;
- de veilige vervalwarmte-afvoer uit de reactorkern moet ook na het uitschakelen steeds gewaarborgd blijven.

Containment-maatregelen zijn actieve en passieve maatregelen die de gevolgen van storingen verzachten of tot het inwendige van de reactor beperken. In hoofdzaak bestaan deze maatregelen daaruit, dat de barrière door haar constructie bestand



Figuur 7
Veiligheidsbarrières van een kweekreactor

blijft tegen de gevolgen van storingen. Het betreft dus passieve maatregelen. Zoals hierna nog uiteengezet zal worden, worden echter ook actieve maatregelen genomen om storingen te beheersen. Voordat een beschrijving wordt gegeven van de belangrijkste *preventieve* en *containment*-maatregelen van de SNR-300 zullen enige veiligheidstechnisch relevante eigenschappen van het natrium – het koelmiddel voor kweekreactoren – worden uiteengezet.

Eigenschappen van het koelmiddel natrium

Natrium reageert met zuurstof uit de lucht en met water. Natrium wordt in de primaire kringloop van de reactor door bestraling met neutronen radioactief. Deze eigenschappen van het koelmiddel maken omvangrijke technische maatregelen noodzakelijk. In hoofdzaak is dit het toepassen van een eveneens met natrium werkende tussen- of secundaire kringloop.
Bovendien worden alle ruimten, waarin zich installaties met radioactief natrium bevinden, gevuld met een chemisch inert gas, bij voorkeur stikstof. Deze ruimten bevinden zich in het binnenste insluitsysteem, zodat minstens nog twee barrières moeten bezwijken voordat een natrium-lucht- of een natrium-water-reactie zou kunnen optreden. Het is evenwel denkbaar, dat natriumbranden optreden in de ruimten met secundaire kringlopen. Daar het natrium in deze kringloop echter niet radioactief is, vormen zulke storingen geen gevaar voor het milieu. Ondanks dat moeten ze worden opgenomen in de veiligheidsbeschouwingen en technisch worden beheerst. Dit is evenwel met de gebruikelijke middelen van de techniek mogelijk.
Wanneer bij natriumgekoelde kweekreactoren het koelmedium uit de reactorkern wordt verwijderd, dan veroorzaakt dit een toeneming van de kettingreactie (= de reactiviteit) en daarmee van het vermogen. Denkbare oorzaken van deze toeneming zijn het koken van het koelmiddel en het stromen van grote gasbellen door de kern. Naar het Engelse begrip *void* (= lege ruimte) wordt deze reactiviteit als *void*-reactiviteit aangeduid. Ook deze eigenschap van natriumgekoelde kweekreac-

toren kan normalerwijze veilig worden beheerst, daar door constructieve maatregelen betrouwbaar kan worden vermeden, dat grote gasbellen door de kern stromen. Met betrekking tot het koken van het koelmiddel is een grote veiligheidsmarge aanwezig, daar tussen bedrijf- en kooktemperatuur van het natrium een temperatuurverschil van meer dan 400°C ligt. De reactor is zo ontworpen dat het koken van natrium ook in storingssituaties wordt vermeden. Pas wanneer nog andere preventieve maatregelen falen, wat weliswaar denkbaar, maar extreem onwaarschijnlijk is, kan het tot het koken van natrium komen en eventueel tot een vermogensexcursie van de reactorkern. Deze gebeurtenis wordt wegens zijn buitengewoon geringe waarschijnlijkheid als hypothetisch aangeduid. Omdat deze storing echter niet absoluut kan worden uitgesloten, worden de gevolgen van zo'n vermogensexcursie in aanmerking genomen bij het ontwerp van de centrale, in hoofdzaak door het nemen van maatregelen bij het *containment*-systeem.

Gunstige eigenschappen van het koelmiddel natrium zijn vooral de praktisch drukloze koelsystemen en de hoge natrium-kooktemperatuur, die dicht bij 900°C ligt. Met name sluit de lage systeemdruk uit, dat er vaten openscheuren en de constructies daaromheen zwaar beschadigen. Zou het ondanks de lage druk tot een scheur in het primaire systeem komen, dan stroomt het natrium zonder te verdampen naar buiten, waarbij de hoge kooktemperatuur het droogkoken van de reactorkern verhindert.

Preventieve maatregelen bij de SNR-300

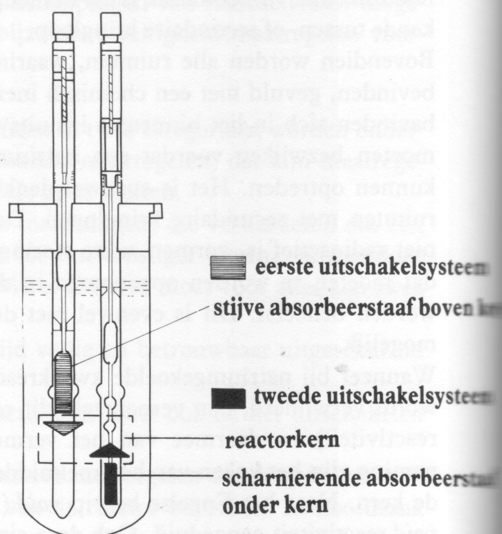
Het is de taak van de preventieve maatregelen storingen in een zo vroeg mogelijk stadium te ontdekken en zo te laten verlopen dat het *containment*-systeem niet te zwaar wordt belast. Om deze taak te vervullen zijn een groot aantal veiligheidsinrichtingen aanwezig, waarvan de afzonderlijke beschrijving hier echter te ver zou voeren. Twee belangrijke eisen aan het gehele systeem werden al genoemd:
- de reactor moet op ieder ogenblik en vanuit iedere situatie uitgeschakeld kunnen worden;
- de warmte, die in de reactorkern nog blijft ontstaan na het uitschakelen, moet veilig afgevoerd worden.

Tengevolge daarvan zijn de belangrijkste systemen die preventieve maatregelen moeten verzorgen: de uitschakelsystemen en de vervalwarmte-afvoersystemen.

Uitschakelsystemen

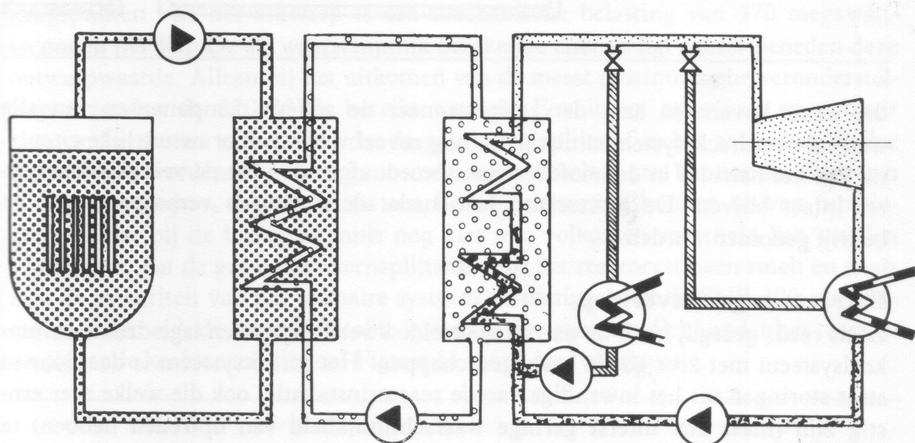
Figuur 8 toont dat de SNR-300 twee volledig gescheiden en in hun constructie verschillende uitschakelsystemen bezit. De absorbeerstaven van het eerste uitschakelsysteem bevinden zich boven de reactorkern. Wanneer de reactor uitgeschakeld moet worden, vallen ze alleen door de zwaartekracht in de reactorkern. Indien dit systeem faalt, wat zeer onwaarschijnlijk is, wordt het tweede uitschakelsysteem in werking gesteld. De absorbeerstaven van dit systeem bevinden zich onder de reactorkern en worden door voorgespannen veren de kern ingetrokken.
De absorbeerstaven van het tweede uitschakelsysteem zijn geleed uitgevoerd, om ook nog in een eventuele vervormde reactorkern getrokken te kunnen worden.

Figuur 8
Uitschakelsysteem van de SNR-300



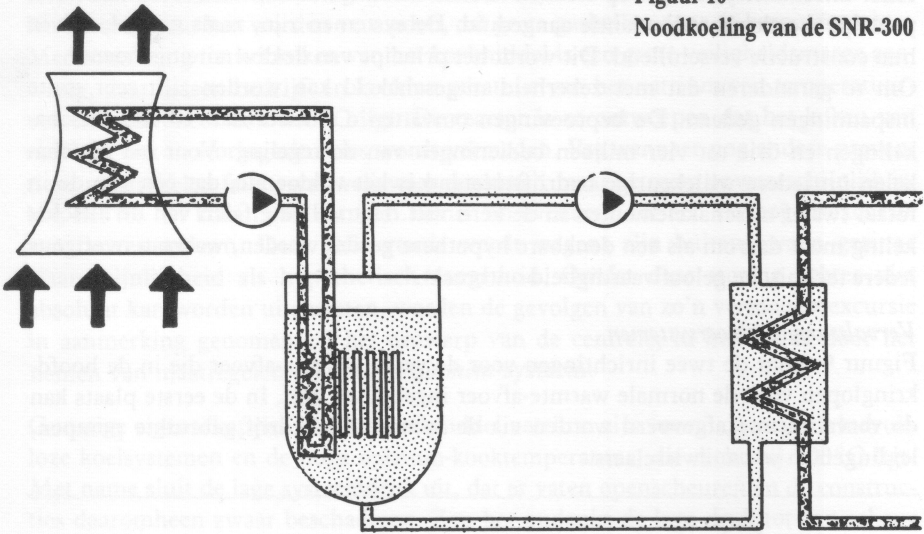
Ieder uitschakelsysteem is op zichzelf in staat de reactor alleen uit te schakelen. Dit principe wordt als redundantie aangeduid. De systemen zijn, zoals gezegd, ook in hun constructie verschillend. Dit wordt het principe van de diversiteit genoemd.
Om te garanderen dat met zekerheid uitgeschakeld kan worden zijn zeer grote inspanningen gedaan. De beproevingen omvatten o.a. meer dan 10.000 uitschakelingen en drie tot vier miljoen bedieningen van de regeling. Voor het uitschakelen uit iedere willekeurige bedrijfstoestand is het voldoende, dat één van de in totaal twaalf uitschakelementen in de kern valt. Het volledig falen van de uitschakeling moet daarom als een denkbare hypothese gezien worden, waaraan overigens iedere technische geloofwaardigheid ontbreekt.

Vervalwarmte-afvoersystemen
Figuur 9 toont de twee inrichtingen voor de vervalwarmte-afvoer die in de hoofdkringlopen voor de normale warmte-afvoer ingebouwd zijn. In de eerste plaats kan de vervalwarmte afgevoerd worden via de in normaal bedrijf gebruikte pompen, leidingen en warmtewisselaars.



Figuur 9
Vervalwarmte-afvoer bij de SNR-300

De vervalwarmte wordt in het water-stoomsysteem, zonder dat de turbine wordt gebruikt, direct via de hoofdcondensor afgevoerd. Een veilige vervalwarmte-afvoer is gegarandeerd wanneer dit systeem in één van de drie parallelle hoofdkringlopen beschikbaar is. Zouden de systemen van alle drie hoofdkringlopen uitvallen, – dit is denkbaar wanneer bijvoorbeeld de externe koelwaterverzorging onderbroken wordt, wat echter buitengewoon onwaarschijnlijk is – dan staat voor de vervalwarmte-afvoer over de hoofdkringlopen een afzonderlijk vervalwarmte-afvoersysteem met eigen condensor en eigen interne koelwaterverzorging ter beschikking.
Een derde mogelijkheid – alleen gedacht in geval van noodkoeling – wordt gevormd door een rechtstreeks in het reactorvat ingebouwd dompelkoelersysteem, dat de vervalwarmte over een eigen natriumkringloop en via een luchtkoeler aan de omgeving afgeeft. Figuur 10 toont deze dompelkoelerinrichting. Dit koelsysteem is ook dan nog in staat te functioneren, wanneer door een of andere oorzaak het natriumniveau in het reactorvat zover zou zijn gedaald, dat de hoofdkringlopen niet meer in staat zijn te functioneren. Ook hieraan zijn de principes van redundantie en diversiteit ten grondslag gelegd. De waarschijnlijkheid van het uitvallen van het systeem ligt bij een statistische waarde van minder dan 10^{-6} (gemiddeld eenmaal falen bij meer dan één miljoen maal uitschakelen). Een later uitgevoerde stu-



Figuur 10
Noodkoeling van de SNR-300

die toont bovendien aan, dat zelfs wanneer de actieve componenten van alle warmte-overdrachtsystemen uitvallen, nog zoveel warmte door natuurlijke circulatie van het natrium in de hoofdsystemen wordt afgevoerd dat de veiligheidsbarrières intact blijven. De reactorkern kan, nadat de storing is verholpen, weer in bedrijf genomen worden.

Extreem ongevalsverloop

Zoals reeds gezegd, heeft de natriumgekoelde kweekreactor een lage-druk natriumkoelsysteem met zeer goede koeleigenschappen. Het insluitsysteem is daardoor in staat storingen uit het inwendige van de reactorinstallatie, ook die welke zeer ernstig zijn (maar een uiterst geringe waarschijnlijkheid van optreden hebben) te beheersen. Tot een mechanische belasting van het insluitsysteem kan het komen door invloeden van buitenaf of door het verloop van een ernstige storing in het inwendige van de reactorinstallatie.

De problematiek van de invloeden van buiten wordt hier niet besproken, daar de beheersing van zulke gebeurtenissen bij alle typen kerncentrales vereist is. Zo moeten alle moderne kerncentrales in de Duitse Bondsrepubliek, dus ook natriumgekoelde kweekreactoren, onder andere tegen het neerstorten van vliegtuigen en tegen aardbevingen worden ontworpen. De veiligheidsvoorzieningen, die daartoe bij de kweekreactor in Kalkar worden gebruikt, komen sterk overeen met die bij andere kerncentrales.

Een zwaarwegende storing, die tot een ernstige belasting van het insluitsysteem zou kunnen voeren, zou alleen dan kunnen optreden, wanneer na een storing of ook gelijktijdig met een storing, bijvoorbeeld het uitvallen van alle hoofdkoelmiddelpompen, de preventieve maatregelen (in dit geval beide uitschakelsystemen) falen. Omdat de waarschijnlijkheid van zo'n storing uiterst klein is wordt ook een dergelijke storing gewoonlijk als hypothetisch aangeduid. Deze benadering vloeit voor uit de zogenaamde probabilistische beschouwingswijze. Daarbij wordt aangenomen dat fout 1 + fout 2 + fout 3 enz. tezamen en ten gevolge van elkaar optreden. Voor het ontwerp van het insluitsysteem wordt in het kader van de goedkeuringsprocedure op grond van de atoomwetgeving het optreden van een storing van deze soort zonder meer verondersteld en er wordt geëist, dat zijn gevolgen veilig binnen de reactorinstallatie kunnen worden beheerst.

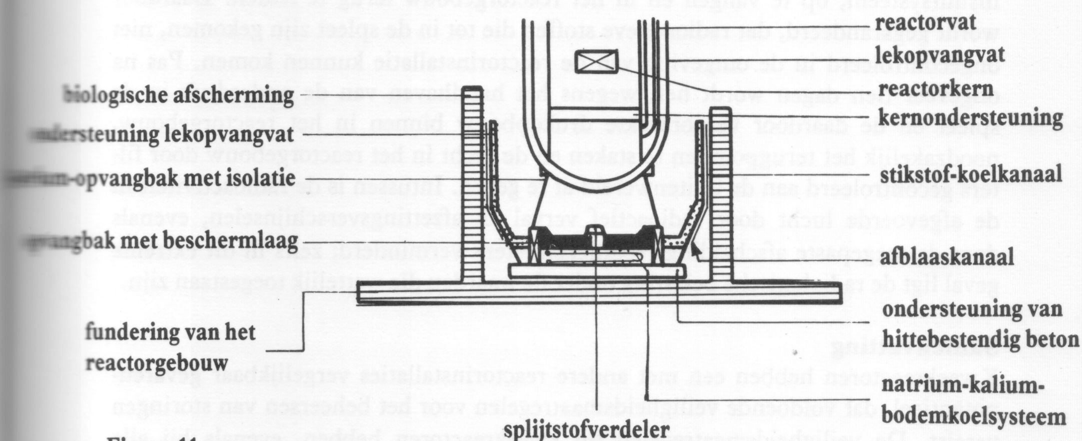
Om het meest extreme storingsverloop, dat als de Bethe-Tait-storing bekend is, te

illustreren, gaat men in eerste instantie uit van de veronderstelling, dat alle hoofdkoelmiddelpompen gelijktijdig uitvallen en beide uitschakelvoorzieningen gelijktijdig falen. Daar dan de stroming van het koelmiddel door de reactor niet meer voldoende is om de ontstane warmte af te voeren, zou het in de reactorkern tot temperatuurverhogingen komen en tenslotte plaatselijk tot koken van het natrium. Zoals reeds gezegd, veroorzaakt het natriumkoken via het *void*-effect een verhoging van de reactiviteit en daarmee van het vermogen.

Tenslotte zou een vermogensexcursie denkbaar zijn, in het verloop waarvan de reactorkern gedeeltelijk of volledig zou worden vernield. De gevolgen van een dergelijke storing, die door het insluitsysteem moeten worden beheerst, zijn:

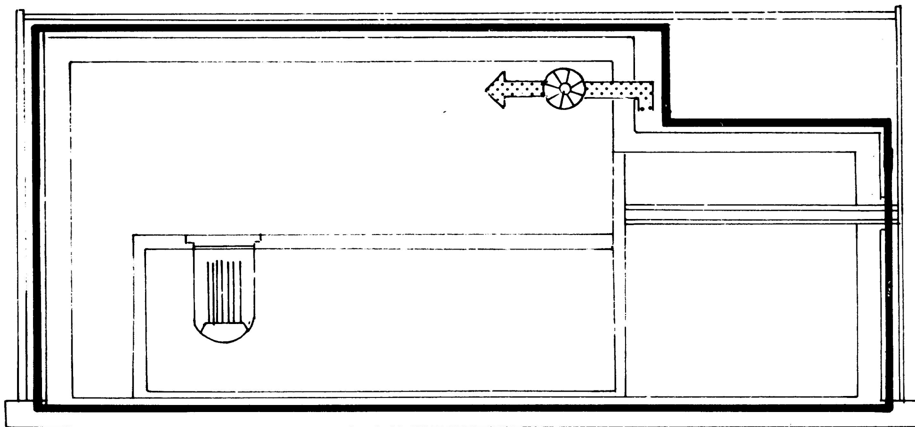
- de vrijgekomen thermische en mechanische energie,
- grote hoeveelheden gesmolten kernsplijtstof, die nog steeds warmte blijft produceren, evenals
- in het insluitsysteem vrijgekomen splijtingsprodukten en aerosolen, die het eigenlijke radiologische gevaar betekenen.

Het reactorvat en de primaire kringloop van de SNR-300 zijn zo geconstrueerd, dat ze met zekerheid bestand zijn tegen de vrijgekomen mechanische energie. Uitgangspunten van het ontwerp is een mechanische belasting van 370 megawattseconden (MWs). De als waarschijnlijk berekende energie ligt echter beneden deze ontwerpwaarde. Alleen bij het uitkomen van de meest pessimistische veronderstellingen zouden de 370 MWs bereikt worden. Een intact reactorvat en primair systeem betekenen echter ook, dat de gesmolten splijtstof in het reactorvat verder gekoeld kan worden. De reeds genoemde dompelkoelers van het noodkoelsysteem zijn zo ontworpen, dat ze ook na een Bethe-Tait-storing kunnen blijven functioneren. Daar bij de huidige kennis nog niet met volkomen zekerheid kan worden uitgesloten, dat de gesmolten kernsplijtstof door het reactorvat heen smelt en daarmee de integriteit van het primaire systeem vernietigt, heeft de SNR-300 een laatste mogelijkheid, de kernsplijtstof te koelen in de vorm van dicht onder het reactorvat liggende koelvoorzieningen. Figuur 11 toont deze constructie.



Figuur 11
SNR *core catcher* (bodem-koelsysteem)

Ze wordt aangeduid met *core catcher*. Deze koelvoorziening moet de gesmolten reactorkern opvangen en koelen totdat hij afgekoeld is. Hij is uitgevoerd als een vat. De wanden zijn bekleed met natriumbestendig isolatiemateriaal. De buitenkant wordt met stikstof gekoeld. De bodem van het vat is bedekt met een beschermende laag van een uiterst temperatuurbestendig materiaal, dat bestand is tegen de hoge temperaturen van de gesmolten kernsplijtstof. Bovendien wordt de bodem door ingebouwde koelspiralen met een natrium-kalium mengsel gekoeld, zodat de



Figuur 12
Gasdichte stalen wand

kernsplijtstof ook gedurende langere tijd veilig kan worden gekoeld. Het is uitgesloten, dat de kernsplijtstof door dit insluitsysteem, dat wil zeggen door de fundering van het reactorgebouw tot in de aarde zal doorsmelten.
Het opsluiten van de aerosolen en van de radioactieve edelgassen moet door het insluitsysteem worden verzekerd. Tot nu toe werd een zodanig verloop van de storing aangenomen, dat de beide eerste gasdichte barrières, zijnde de hulzen van de splijtstofpinnen in de reactorkern en het primaire systeem, vernield worden. Als barrières blijven de betonnen wanden van het binnenste en buitenste *containment* over, evenals de alles omgevende gasdichte stalen mantel met de spleet met onderdruk (zie figuur 7).
De spleet tussen het buitenste insluitsysteem en de stalen mantel, zoals hij in figuur 12 wordt getoond, wordt onder onderdruk gehouden, om lekkagegas van buitenaf, evenals lekkagegas door de buitenste betonnen wand van het buitenste insluitsysteem, op te vangen en in het reactorgebouw terug te leiden. Daardoor wordt gegarandeerd, dat radioactieve stoffen die tot in de spleet zijn gekomen, niet ongecontroleerd in de omgeving van de reactorinstallatie kunnen komen. Pas na ongeveer tien dagen wordt het, wegens het handhaven van de onderdruk in de spleet en de daardoor veroorzaakte drukopbouw binnen in het reactorgebouw, noodzakelijk het terugpompen te staken en de lucht in het reactorgebouw door filters gecontroleerd aan de buitenwereld af te geven. Intussen is de radioactiviteit in de afgevoerde lucht door radioactief verval en afzettingsverschijnselen, evenals door de toegepaste afscheidingstechnieken, sterk verminderd; zelfs in dit extreme geval ligt de radiologische belasting onder de waarden die wettelijk toegestaan zijn.

Samenvatting

Kweekreactoren hebben een met andere reactorinstallaties vergelijkbaar gevarenpotentieel, dat voldoende veiligheidsmaatregelen voor het beheersen van storingen vereist. De veiligheidsmaatregelen bij kweekreactoren hebben, evenals bij alle andere reactorinstallaties, een uiterst hoge betrouwbaarheid. Ze worden onderverdeeld in veiligheidsmaatregelen die storingen verhinderen (*preventieve* maatregelen) en veiligheidsmaatregelen die gevolgen van ingetreden storingen verzachten en binnen de reactorinstallatie houden (*containtment*-maatregelen). De SNR-300 is zo geconstrueerd dat zelfs de meest extreem denkbare storing, die buitengewoon onwaarschijnlijk is en als Bethe-Tait-storing bekend staat, binnen de reactorinstallatie kan worden beheerst en niet tot een ontoelaatbare radiologische belasting van de omgeving leidt.
De technologie van de kweekreactor biedt een mogelijkheid om energie te verschaf-

fen en wel de enige, die tot nu toe technisch beschikbaar is, waarbij de brandstofreserves geen beperking meer vormen. Tegen de achtergrond van de beperkte reserves aan fossiele energie betekent dat de mogelijkheid om lange tijd energie te leveren en vrijwel volledige onafhankelijkheid in de brandstofverzorging. De sombere situatie op het gebied van de energievoorziening maakt het nodig de ontwikkeling van kweekreactoren voort te zetten, tot ze rijp voor de markt zijn, om deze technologie ter beschikking te hebben als een optie bij de energiehuishouding. De economische toepassing hangt sterk af van de beschikbare hoeveelheden natuurlijk uranium en van de verdere ontwikkeling van de behoefte aan kernenergie en is, naar huidige inzichten, ongeveer tegen de eeuwwisseling te verwachten.

Literatuur

Fast Breeder Reactors: Economic and Safety Aspects, European Parliamentary Hearing, December 1979. AS/inf. (80) 1, Strasbourg 1980.

Diverse artikelen over kweekreactoren, *Atomkernenergie/Kerntechniek 36,* no. 4, blz. 241-291.

Role of Breeder Reactor System in the European Community, UNIPEDE/CEC Breeder Reactor Study Group. Commissie van de Europese Gemeenschappen, september 1981.

P.J. van der Hulst, Veiligheidsaspecten van de Natriumgekoelde Snelle Reactor SNR-300, *Elektrotechniek 59* (1981) no. 11 (november), blz. 677-697.

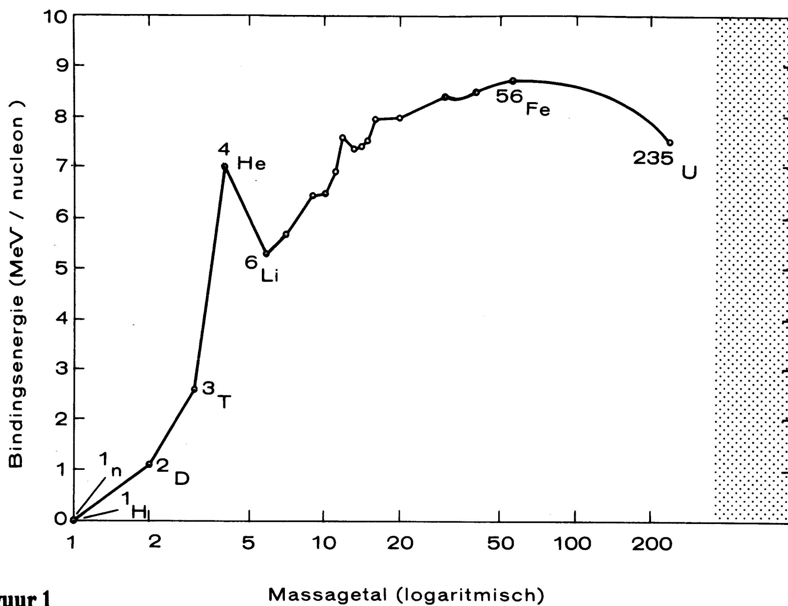
P.J. van der Hulst, De Toekomstige Rol van Kweekreactoren in de EG, *Energiespectrum 6* (1982) no. 2 (februari), blz. 49-61.

10. KERNFUSIE

C.M. Braams

Behalve de in het voorgaande hoofdstuk beschreven ontwikkeling is er nog een tweede, die de toepassing van kernenergie voor de zeer lange termijn mogelijk kan maken. Het betreft hier niet de splijting van zware atoomkernen maar de samensmelting of fusie van lichte atoomkernen. Ook daarbij komt veel energie vrij. Omdat van de desbetreffende kernen – isotopen van waterstof – zeer veel in de natuur voorkomen, is hier nauwelijks sprake van een beperking van grondstoffen. Fusiereacties zijn echter veel moeilijker te realiseren dan splijtingsreacties (waarvoor één of twee neutronen voldoende zijn), omdat de samen te brengen atoomkernen elkaar sterk afstoten zolang ze niet vlak bij elkaar zijn. De kernen moeten elkaar met zeer hoge snelheid naderen. Om dit te bereiken kan men kernen van deuterium en tritium verhitten tot een gas van 200 miljoen graden. Dit zogenaamde plasma moet met magnetische velden worden ingesloten, wat door instabiliteiten wordt bemoeilijkt. Ook kan men aan de voorwaarden voldoen door een bolletje van deuterium en tritium met een zeer intense flits van licht of deeltjes te bestralen. In beide gevallen is nog veel onderzoek nodig voordat gesteld kan worden dat kernfusie een bruikbaar kernenergiesysteem zal opleveren.

Kernreacties kunnen worden beschreven als processen waarin nucleonen (protonen en neutronen) worden herverdeeld over kernen. Bij exotherme reacties komt energie vrij in de vorm van straling of kinetische energie (warmte). Bindingsenergie is negatieve potentiële energie; een reactie is daarom exotherm als de som van de bindingsenergieën van de reactieprodukten groter is dan die van de reagerende kernen. De bindingsenergie wordt op grond van de relatie $E = mc^2$ uitgedrukt in het 'massa-defect', dat met behulp van massaspectrografie gemeten kan worden.
Het bovenstaande is, als men het woord nucleon door atoom vervangt en kern door molecuul, zonder meer van toepassing op chemische reacties, behalve dat het chemische massadefect niet rechtstreeks gemeten kan worden omdat het relatief zoveel geringer is. Maar in een kolengestookte elektrische centrale wordt evenveel massa omgezet in energie als in een kernreactor van hetzelfde thermische vermogen, dus ook in dit opzicht is er een sterke analogie tussen nucleaire en atomaire (= chemische) reactieprocessen.
Nucleaire bindingsenergie wordt uitgedrukt in mega-elektronvolt (MeV) (de massa van het proton komt overeen met 911 MeV). Een grafiek van de bindingsenergie van stabiele kernen als functie van de kernmassa (figuur 1) vertoont een breed maximum in de eerste helft van het periodieke systeem, in het gebied van de ijzer- en nikkel-isotopen. Het maximum bedraagt 8,8 MeV per nucleon voor ijzer-56, maar reeds dicht bij het begin ziet men dat helium-4 al 7 MeV per nucleon heeft. Helemaal aan het eind van het periodieke systeem vindt men de splijtbare kernen met 7,5 MeV per nucleon.
In sterren zoals de zon vormen kernreacties (naast de zwaartekracht) de voornaamste bron van de energiestroom die in de vorm van straling of van deeltjesstromen (de zonnewind) naar buiten treedt. Gedurende het grootste deel van de sterevolutie wordt die energie in hoofdzaak geleverd door de omzetting van waterstof in helium; pas als het waterstof is opgebrand kan de ster verder contraheren naar een



Figuur 1
Bindingsenergie als functie van het aantal nucleonen (Raeder et al.)

---

toestand met hogere temperatuur en dichtheid. Lange reactieketens leiden dan tot de vorming van een thermodynamisch evenwicht, waarin volgens een stelling van Boltzmann de laagste energietoestand (ijzer) het sterkst vertegenwoordigd is. Men kan zeggen dat de ster dan is 'opgebrand'. Voor de verdere evolutie van de ster, waarin neutronenreacties aanleiding geven tot het ontstaan van zware kernen, is dan alleen nog energie van de zwaartekracht beschikbaar.

Als we de nucleaire bindingsenergie in aardse installaties nuttig willen maken, stuiten we op twee fundamentele problemen. We kunnen namelijk geen gebruik maken van de *economy of scale* die de sterren ten dienste staat. In de eerste plaats kunnen de sterren de benodigde verbrandingstemperatuur in stand houden met een zeer geringe vermogensdichtheid. Als men het vermogen dat door de fotosfeer van de zon wordt uitgestraald omslaat over het gehele volume, vindt men een gemiddelde energieproduktie van 0,3 W per m^3, die blijkbaar voldoende is om het verbrandingsproces gaande te houden. In een magnetisch opsluitsysteem is voor dat doel een vermogensdichtheid in de orde van enkele MW per m^3 vereist en in het geval van traagheidsopsluiting zelfs 10^{30} W per m^3.

Het tweede punt waarop de zon in het voordeel is heeft te maken met de stabiliteit van een thermonucleair plasma in enigerlei opsluitsysteem. De zwaartekracht waarmee een ster bij elkaar gehouden wordt is een stabiele opsluitingsmethode, terwijl het gebruik van elektrische en magnetische, of traagheidskrachten waarop men aangewezen is als men thermonucleaire brandstof vrij wil houden van een vacuümvat, een in principe instabiele opsluiting oplevert.

Om te ontkomen aan de beperking ten aanzien van de vermogensdichtheid waarmee de zon moet en ook kan leven, zijn we gedwongen om hetzij de dichtheid op te voeren, hetzij een andere, men zou kunnen zeggen veredelde brandstof te gebruiken. En omdat de druk van de brandstof, dus ook de dichtheid aan technische beperkingen onderhevig is, moeten we het in de brandstof zoeken. De meest reactieve kern is deuterium, zware waterstof waarvan de kern, het deuteron, is opgebouwd uit één proton en één neutron. Deze isotoop komt door zijn grote reactiviteit in het inwendige van sterren vrijwel niet voor. Toch vinden we in natuurlijk waterstof een kleine fractie zware waterstof die in het heelal gevormd is in omstandigheden waarin de temperatuur en de dichtheid te laag waren om het deuteron zijn natuurlijk lot te laten ondergaan. Eén van de veredelde brandstoffen

waarop hierboven werd gedoeld is dit deuterium, dat we gemakkelijk met fysische of chemische middelen uit natuurlijk waterstof kunnen afzonderen.
Deuterium kan bij een temperatuur van enkele honderden miljoenen graden met zichzelf reageren en daarmee een reactiecyclus inleiden die uiteindelijk tot de vorming van helium-4 leidt. De bindingsenergie van deuterium is 1,1 MeV per nucleon zodat veruit het grootste deel van de totale versmelting van waterstof tot ijzer, waarmee de sterren 8,8 MeV per nucleon verdienen, bij volledige versmelting van deuterium tot helium zou vrijkomen. Zover zal het in fusiereactoren niet komen, maar een gedeeltelijke 'versmelting' vindt plaats in twee reactiecycli met als tussenstappen respectievelijk tritium en helium-3 (tabel I). In strikte zin kan men niet van versmelting spreken, omdat bij elke reactie met een deuteron slechts één van de twee nucleonen in de andere kern wordt opgenomen terwijl het tweede nucleon vrijkomt. Het eindresultaat is evenwel dat drie deuteronen een zwaardere en een lichtere kern, alsmede een neutron hebben opgeleverd.

Tabel I. Deuterium-cyclus

D	+	$D \rightarrow$	^{3}He	+	n	+	3,3 MeV
D	+	$D \rightarrow$	T	+	H	+	4,0 MeV
^{3}He	+	$D \rightarrow$	^{4}He	+	H	+	18,3 MeV
T	+	$D \rightarrow$	^{4}He	+	n	+	17,6 MeV
	2 ×	($3D \rightarrow$	^{4}He	+	$H+n$	+	21,6 MeV)

Als we de bovenbeschreven reactie-cyclus vergelijken met wat er in de sterren gebeurt, dan kunnen we, zonder hier nu verder op de stellaire processen in te gaan, stellen dat de reacties in de sterren waarbij waterstof (^{1}H) als brandstof fungeert zeer veel langzamer verlopen dan bovenstaande deuteriumreacties en daarom op aarde volstrekt onbruikbaar zouden zijn.
Van de in tabel I vermelde reacties verloopt die tussen D en T het snelst. Ondanks het bezwaar dat men daarvoor eerst tritium moet produceren, ziet het er naar uit dat tenminste de eerste generaties van fusiereactoren op deze reactie zullen zijn gebaseerd. Tritium vervalt met een halveringstijd van twaalf jaar zodat het in de natuur slechts zeer sporadisch voorkomt (het wordt hoog in de atmosfeer door kosmische straling geproduceerd). Men kan het echter maken door neutronen te laten vallen op lithium, hetzij in een splijtingsreactor hetzij in een fusiereactor. De meest voor de hand liggende conceptie van de fusiereactor omvat daarom een reactievat waarin deuterium met tritium reageert en dat is omgeven door een kweekmantel waarin de neutronen van de $D+T$-reactie in lithium (Li) worden geabsorbeerd en het daarbij gevormde tritium wordt gewonnen. Men heeft dan de volgende reactiecyclus:

Tabel II. D + Li-cyclus

D	+	$T \rightarrow$	^{4}He	+	n	+	17,6 MeV
^{6}Li	+	$n \rightarrow$	^{4}He	+	T	+	4,8 MeV
D	+	$^{6}Li \rightarrow$	$2\,^{4}He$			+	22,4 MeV

Ofschoon tabel II een sluitende reactiecyclus vertoont, kan men daarmee niet volstaan omdat zelfs het geringste verlies van tritium of van neutronen uiteindelijk tot uitputting van de brandstof zou leiden. Men heeft daarom nog een reactie nodig waarmee voldoende extra tritiumkernen of neutronen kunnen worden gemaakt om tenminste de verliezen te compenseren en bovendien extra brandstof te kunnen kweken voor het gebruik in nieuw te ontsteken reactoren. Daarvoor bestaan moge-

lijkheden te over, want de in het reactievat gevormde neutronen hebben een grote energie waardoor ze, afhankelijk van de materialen waarin ze worden opgevangen, verschillende kernreacties kunnen veroorzaken. Vooral de zwaardere materialen, waarvan de kernen een neutronenoverschot hebben, kunnen in (n, $2n$)-reacties neutronen afstaan. In het bijzonder is het gebruik van een mengsel van lood en lithium in de kweekmantel voorgesteld.
Van de reactie-energie die in de $D+T$-reactie vrijkomt wordt 80% afgevoerd door de gevormde neutronen. Deze dringen decimeters-diep in de kweekmantel en geven daarin hun energie af alvorens ze met het lithium reageren. De overige 20% wordt meegegeven aan de gevormde ^4He-kern, die in de verbrandingsruimte moet worden afgeremd om ervoor te zorgen dat de warmteverliezen worden gecompenseerd en het verbrandingsproces in stand wordt gehouden.
We kunnen het tot hier toe ontwikkelde beeld van een mogelijke fusiereactor als volgt samenvatten: een verbrandingsruimte waarin deuterium en tritium bij een temperatuur van rond 200 miljoen kelvin reageren. Deze temperatuur wordt gehandhaafd doordat de gevormde heliumkernen in de brandstof worden afgeremd, terwijl de gevormde neutronen in een één meter dikke lood-lithiummantel zowel hun energie afstaan, als nieuw tritium kweken. Ook de energie van de heliumkernen bereikt uiteindelijk in de vorm van stralingswarmte de binnenwand van deze mantel. Door het koelmiddel (een gas, stoom, of het vloeibare lithium-loodmengsel zelf) wordt de warmte, zoals in elke thermische elektrische centrale, getransporteerd naar een 'conventioneel' conversiesysteem, bestaande uit een turbine en een generator.

Het is duidelijk dat van al de ongewone zaken die hier genoemd zijn, de verbrandingskamer met een temperatuur van 200 miljoen kelvin wel het verst verwijderd is van de bestaande technische mogelijkheden. Allereerst is er het probleem om de brandstof op die temperatuur te brengen en te houden waarbij direct contact met de wand volstrekt ontoelaatbaar is; vervolgens moet de wand bestand zijn tegen de stroom van energetische neutronen die uit de verbrandingsruimte in de kweekmantel moeten binnendringen.
Tot nu toe is het fusie-onderzoek voor het overgrote deel gericht op het eerste onderwerp, maar naarmate er oplossingen voor het ontsteken en opsluiten van thermonucleaire brandstof boven de horizon komen, gaan ook de problemen van de wand en de kweekmantel meer aandacht krijgen.

De verbrandingsruimte

Voor het probleem om een thermonucleaire brandstof zonder wandcontact op de vereiste hoge temperatuur te brengen en te houden zijn in principe twee oplossingen aan te geven: magnetische opsluiting en traagheidsopsluiting. Eerstgenoemde methode berust erop dat de thermonucleaire brandstof, zo goed als elke stof die men boven ruwweg 10.000 graden verhit, in de plasmatoestand verkeert, dat wil zeggen niet meer bestaat uit moleculen of atomen, zoals een gewoon gas, maar uit ionen en elektronen, de elektrisch geladen bouwstenen van de atomen. Het plasma is een uitstekende geleider voor elektrische stromen en kan daarmee in magnetische velden worden opgesloten. Tevens kunnen die stromen gebruikt worden om het plasma te verhitten. Is de opsluiting voldoende effectief – de kwaliteit daarvan wordt afgemeten aan de zogenaamde energie-opsluittijd – dan kan de verbrandingstemperatuur in stand gehouden worden met behulp van de warmte die bij het nucleaire verbrandingsproces vrijkomt. Het plasma is dan 'ontstoken'. Dit laatste is overigens geen strikte eis; het is ook denkbaar dat een fusiereactor juist iets minder warmte produceert dan de brandstof aan zijn omgeving verliest zodat er nog een, relatief kleine, energiestroom nodig is om het proces gaande te houden. Men stelle

zich voor een ontladingsvat, dat is omgeven door spoelen (waarschijnlijk supra-geleidend), zo gerangschikt dat een magnetisch veld ontstaat met het gewenste krachtlijnen-verloop en waarin met behulp van deeltjesversnellers dan wel sterke radiozenders de brandstof wordt ontstoken of bijna ontstoken en op temperatuur gehouden.
De andere mogelijkheid is traagheidsopsluiting. Wandcontact van het brandend plasma wordt daarbij vermeden doordat men een klein bolletje gevuld met deuterium en tritium met een zeer intense flits bestraalt. Die stralenbundel kan bestaan uit licht, afkomstig van een laser of uit deeltjes, afkomstig van een versneller. In elk geval gaat het erom een zo hoge stralingsintensiteit te bereiken dat het oppervlak van het bolletje verdampt en de brandstof, als door de werking van een raket, wordt samengedrukt tot een zeer hoge dichtheid en tot de ontstekingstemperatuur van 50 miljoen kelvin. Het is daartoe nodig dat het hele proces zich afspeelt binnen een miljardste seconde, en het probleem van de traagheidsopsluiting is om een bron van corpusculaire- of stralingsenergie te ontwikkelen, die in die korte tijd een energie als van een handgranaat in een volume in de orde van één kubieke millimeter concentreert. Wil hieruit een netto energie-opbrengst resulteren dan zal bij de thermonucleaire verbranding honderdmaal meer energie moeten vrijkomen dan door de bundel werd geleverd, en deze explosie moet worden opgevangen door een meters groot drukvat. En uiteraard is ook hier weer de lithiummantel nodig voor het kweken van tritium.
Van alle denkbeelden over fusiereactoren die tot dusver naar voren zijn gekomen, is dat van de tokamak (een bepaalde magnetische veldconfiguratie) het verst ontwikkeld. De maat voor dit succes is, zoals we hierboven al zagen, de energieopsluittijd, dat is de tijd die het plasma nodig heeft om af te koelen als de toevoer van warmte wordt stopgezet. Is die tijd te kort, met andere woorden: koelt het plasma te snel af, dan lukt het noch met verhitting door externe vermogensbronnen om de verbrandingstemperatuur te bereiken, noch met kernreacties in het plasma, om deze vast te houden. Het is de kunst om magnetische velden te vinden waarmee in een niet al te grote verbrandingskamer en met een technisch realiseerbare magnetische veldsterkte een voldoende mate van warmte-isolatie wordt gerealiseerd. In dit opzicht ligt de tokamak thans aanzienlijk vóór op concurrerende systemen.

De kweekmantel

Zoals we zagen, moet de verbrandingskamer worden omgeven door een mantel die een aantal functies in zich verenigt. Allereerst moet de mantel fungeren als een vacuümsysteem om te voorkomen dat de brandstof wordt verontreinigd. Aan installaties voor traagheidsopsluiting en voor magnetische opsluiting worden enigszins verschillende eisen gesteld; voor de overzichtelijkheid beperken wij ons in de verdere bespreking tot magnetische opsluiting. De daarvoor vereiste plasmadichtheid is in de orde van één miljoenste van die van de atmosfeer. De toelaatbare verontreinigingsgraad is minder dan 1%, zodat er hoge eisen worden gesteld aan de vacuümtechniek. Vervolgens moet in de mantel tritium worden gekweekt uit de reactie van lithium met neutronen. Om de gekweekte brandstof uit de mantel te krijgen moet men het lithium door een zuiveringsinstallatie laten circuleren of een spoelgas door de mantel leiden waaruit het tritium later wordt afgezonderd. In het eerste geval komt lithium in vloeibare vorm, hetzij metallisch hetzij in een vloeibaar zout in aanmerking, in het tweede geval kan men aan vaste lithiumverbindingen met helium als spoelmiddel denken. Tenslotte moet de reactie-energie, die grotendeels door de neutronen naar de mantel wordt getransporteerd en daar in warmte wordt omgezet, worden afgevoerd. Vloeibaar lithium dat als kweekmateriaal wordt gebruikt, kan tevens als koelmiddel dienen; anders kan deze rol worden overgenomen door het reeds als mogelijk spoelmiddel genoemde helium.
 De materialen die in de mantel worden gebruikt, in het bijzonder in de vacuüm-

wand, worden blootgesteld aan sterke neutronenstraling, waardoor zwelling en verbrossing gaan optreden. Tot de technische problemen waarop men bij het ontwerpen van mantels bedacht moet zijn, behoren daarnaast de corrosie van materialen, vooral door vloeibaar lithium, en de diffusie van tritium door allerlei metalen. Dit hele complex van problemen betekent een enorme uitdaging voor de technologie. Géén van deze problemen afzonderlijk is kennelijk onoplosbaar, maar de discussie over hoe één mantelconstructie tegemoet komt aan alle gestelde eisen is nog in volle gang. Daarbij kan niet over het hoofd worden gezien dat er tussen de in aanmerking komende materialen grote verschillen bestaan ten aanzien van de hoeveelheid radioactiviteit die door de neutronenbestraling wordt gevormd. Die levert na gebruik in de reactor een afvalprobleem en tijdens het bedrijf een veiligheidsprobleem op. In recente ontwerpstudies voor fusiereactoren komt de combinatie van een vloeibare lithium-loodlegering met roestvrijstaal structuurmateriaal sterk naar voren; het laatste vooral omdat daarmee veel meer metallurgische ervaring voorhanden is dan met andere in aanmerking komende metalen, al zou men op den duur een oplossing met minder activeringsproblemen willen vinden.

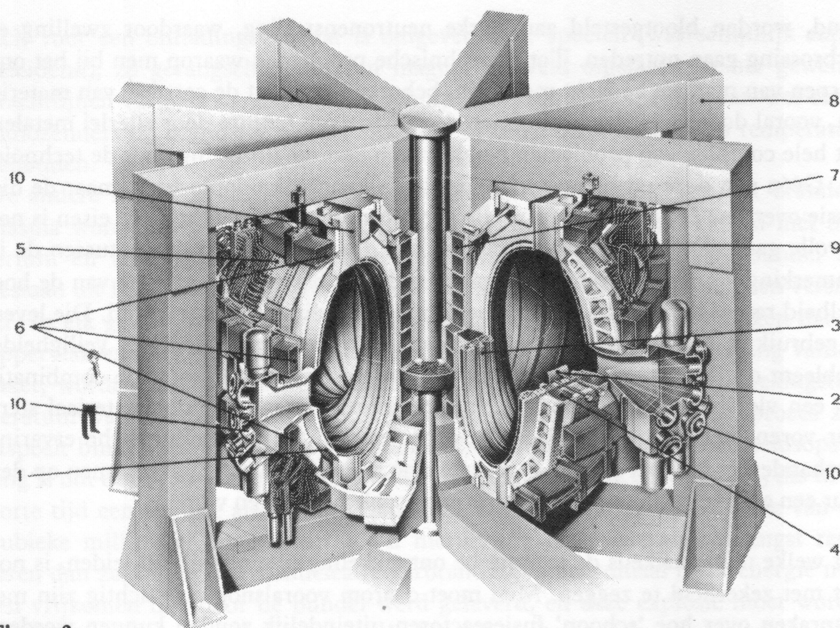
Tot welke materiaalkeus de technische ontwikkeling uiteindelijk zal leiden, is nog niet met zekerheid te zeggen. Men moet daarom vooralsnog voorzichtig zijn met uitspraken over hoe 'schoon' fusiereactoren uiteindelijk zouden kunnen worden, want in het meest ongunstige geval is het voordeel ten opzichte van kernsplijting niet bijzonder groot. Mogelijkheden om met betrekking tot reactorveiligheid en afvalberging tien- tot honderd-, of zelfs duizendmaal gunstiger uit te komen zijn in principe aanwezig en alleen verder onderzoek en ontwikkeling zullen leren of deze mogelijkheden op technisch en economisch aanvaardbare wijze gerealiseerd kunnen worden.

Status en vooruitzichten

We hebben reeds opgemerkt dat het meest geavanceerde opsluitsysteem dat thans ter beschikking staat de tokamak is. Als de voortekenen niet bedriegen, zal daarmee over enkele jaren het *proof of principle* van de magnetische opsluiting van een thermonucleair reagerend plasma worden geleverd. De installaties waarin dit moet gebeuren zijn in de Verenigde Staten, Europa, Rusland en Japan in aanbouw en komen rond 1984 in bedrijf.

De gezamenlijke Europese tokamak 'JET' (*Joint European Torus*) wordt in Culham nabij Oxford gebouwd. In de periode 1983-1987 zal men, door geleidelijk meer vermogensbronnen voor de verhitting van het plasma bij te schakelen, te weten komen of het zin heeft tritium als brandstof in de machine te laten teneinde het thermonucleaire vuur te ontsteken. De afmetingen en vooral de magnetische veldsterkte in JET zijn voor dit doel misschien groot genoeg, waarschijnlijk echter nog iets te klein. Van de afmetingen geeft figuur 2 een indruk; de kosten van deze onderneming bedragen bijna 2 miljard gulden, die door de Europese Gemeenschap en de aangesloten landen, verdeeld over een periode van twaalf jaar, bijeen worden gebracht. Ook als het plasma in JET niet tot ontsteking komt, maar dit punt voldoende dicht benadert, zal dit als een succes kunnen worden beschouwd.

Om na succesvol bedrijf van de experimenten van de JET-generatie tot een demonstratiereactor te komen waarin de economische toepasbaarheid van kernfusie kan worden aangetoond, zijn nog een aantal stappen nodig. Tussen JET en de demonstratiereactor is waarschijnlijk één tussenstap (misschien meer dan één) nodig. Men denkt aan testreactoren, waarin de technologie van de kweekmantel kan worden beproefd. Pas op grond van daarmee opgedane ervaringen zal men een demonstratiereactor willen bouwen. Maar ook vóor nader onderzoek naar de fysische grondslagen van magnetische opsluiting zullen nog verscheidene middelgrote tot grote experimenten moeten worden verricht.



Figuur 2
Joint European Torus (JET)
1 **dubbelwandig vacuümvat;** ***2*** **diafragma;** ***3*** **afscherming voor het vat;** ***4*** **spoel voor het toroidale veld;** ***5*** **mechanische structuur;** ***6*** **buitenste spoel voor het poloïdale vlak;** ***7*** **binnenste spoel voor het poloïdale veld (primaire transformatorwinding);** ***8*** **transformatorkern;** ***9*** **aansluiting voor stroom en koelwater in** ***4*****;** ***10*** **toegang voor verhitting en diagnostiek.**

Het is moeilijk, zich een ontwikkeling voor te stellen die ertoe zou leiden dat commerciële toepassing van kernfusie voor de produktie van elektriciteit vóór het jaar 2020 gerealiseerd zou kunnen worden. Het is gemakkelijk, redenen te bedenken waardoor een dergelijke ontwikkeling vertraagd zou kunnen worden. Toekomstvoorspelling op een zo lange termijn is zinloos; wat echter wel zin heeft is doelstellingen voor een onderzoek- en ontwikkelingsprogramma te formuleren, gebaseerd op plausibele scenario's. In de VS gaat men ervan uit dat de demonstratiereactor in de eerste jaren van de volgende eeuw in bedrijf moet worden gesteld. In Europa reikt de planning minder ver en is het doel om tegen het eind van de jaren tachtig tot de bouw van een testreactor over te gaan, waarbij de ervaring met JET van doorslaggevende betekenis zal zijn.

Kernfusie is één van de drie mogelijke bronnen van energie die op lange termijn de energievoorziening van de wereld veilig zouden kunnen stellen. De andere twee zijn kernsplijting in kweekreactoren en zonne-energie. De toepassingsmogelijkheden op de vereiste zeer grote schaal van alle drie zijn nog onzeker, hetzij vanwege maatschappelijke aspecten, hetzij door technische en economische problemen. Het is denkbaar dat een combinatie van zonnewarmte voor lage temperatuur en kernenergie (splijting en/of fusie) voor hoge temperatuur, voor lange tijd nog aangevuld met fossiele brandstoffen, het beeld van de toekomst zal bepalen. Vast staat in ieder geval, dat in de komende decennia de basis gelegd, respectievelijk voltooid, moet worden voor ingrijpende veranderingen in ons energie-gebruikspatroon, zowel aan de aanbod- als aan de vraagzijde. De mogelijkheid bestaat dat kernfusie daarbij naar voren komt als één van de grootste energiebronnen, zo niet de allergrootste. En lang voordat de eventuele toepassing op grote schaal een feit is, zal de wetenschap of die mogelijkheid ter beschikking staat, van invloed zijn op de ontwikkeling die de samenleving zich op het gebied van het energiegebruik kan veroorloven.

Literatuur

J. Raeder et al., *Kontrollierte Kernfusion,* B.G. Teubner, Stuttgart 1981.

W. Häfele et al., *Fusion and Fast Breeder Reactors,* IIASA-Report RR-77-8, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg 1977.

B. Brandt et al., *On Fusion and Fission Breeder Reactors: The IIASA Report RR-77-8 reviewed and updated,* Rijnhuizen Report 81-129, Nieuwegein 1981.

Diverse bijdragen in *Energiespectrum*.

II MILIEU

11. AANVAARDBARE STRALINGSDOSES

Y. van der Feer

De internationale, breed samengestelde commissie van deskundigen ICRP heeft een aantal jaren geleden nieuwe aanbevelingen gepubliceerd voor bescherming van de mens tegen ioniserende straling. Voornaamste uitgangspunt van deze aanbevelingen is dat blootstelling aan straling alleen gerechtvaardigd is als het nut van het gebruik van de stralingsbron opweegt tegen het risico verbonden aan de mate van bestralingsbelasting. Verdere voorwaarden zijn dat de totale stralingsbelasting van alle bestraalde personen zo laag mogelijk dient te zijn als op grond van sociale en economische overwegingen verantwoord is en dat individuele stralingsdoses in ieder geval niet uit mogen komen boven zekere dosislimieten.
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de ontwikkeling van de ICRP-normen van uitsluitend dosislimieten tot het huidige systeem van afweging van nut tegen risico, een ontwikkeling die mogelijk was door de groeiende kennis van de biologische effecten van ioniserende straling. De ICRP-normen zijn ook in Nederland het uitgangspunt voor de wetgeving op het gebied van de stralingsbescherming.

Inleiding

Straling die in staat is de atomen in materie te ioniseren, wordt ioniserende straling genoemd. De ionisatie, het vrijmaken van elektronen uit het normale atoomverband, is een gevolg van het afgeven van energie door de straling aan de materie. Er zijn twee soorten ioniserende straling, deeltjes-straling bestaande uit geladen of ongeladen atomaire deeltjes en elektromagnetische straling, die bestaat uit pakketjes energie die voortbewegen met de snelheid van het licht.
Ook in biologisch materiaal veroorzaakt ioniserende straling ionisaties. Dit kan beschadiging van de cellen waaruit dit materiaal is opgebouwd tot gevolg hebben. De kans op schade is afhankelijk van de grootte van de *geabsorbeerde dosis:* dit is de door de straling per kilogram afgegeven hoeveelheid energie. De oude eenheid voor geabsorbeerde dosis is de rad, die overeenkomt met een energie-afgifte van 0,01 joule per kilogram. In het SI-stelsel is de eenheid de gray (Gy). Deze komt overeen met een energie-afgifte van 1 joule per kilogram bestraald materiaal.
Niet alle soorten ioniserende straling zijn biologisch even effectief. Dit is een gevolg van verschillen in ruimtelijke verdeling van de ionisaties in het bestraalde materiaal. In de stralingsbescherming wordt deze effectiviteit van de soort straling in rekening gebracht door de geabsorbeerde dosis te vermenigvuldigen met de *kwaliteitsfactor* voor de desbetreffende soort straling. De aldus verkregen grootheid is het *dosisequivalent,* dat we kortheidshalve verder zullen aanduiden met *dosis.* De oude eenheid voor dosisequivalent is de rem. In het SI-stelsel is de eenheid de sievert (Sv). Eén sievert komt overeen met 100 rem.
Ieder mens wordt dagelijks blootgesteld aan ioniserende straling. Deze straling is afkomstig uit het heelal, de kosmische straling, en uit de aardkorst waarin zich radioactieve stoffen bevinden. Ook geringe hoeveelheden radioactief materiaal in

het lichaam leveren een bijdrage tot de stralingsbelasting van de mens. Per jaar ontvangt ieder mens uit natuurlijke stralingsbronnen een dosis van ongeveer 0,1 rem.
De mens heeft aan deze natuurlijke stralingsbronnen een aantal kunstmatige toegevoegd. De voornaamste hiervan zijn de röntgentoestellen en de kunstmatig geproduceerde radioactieve stoffen. Bij de kernenergie zijn het voornamelijk de radioactieve stoffen die ontstaan bij het kernsplijtingsproces, de splijtingsprodukten, die een extra stralingsbelasting van de mens kunnen veroorzaken.
Omdat blootstelling van de mens aan ioniserende straling de gezondheid kan schaden, dient de mate van blootstelling aan kunstmatige stralingsbronnen te worden beperkt. Normen voor bescherming van de mens tegen de schadelijke invloed van ioniserende straling worden opgesteld door de *International Commission on Radiological Protection* (ICRP). De aanbevelingen van deze commissie, die in 1928 werd opgericht tijdens het *2nd International Congress of Radiology*, dienen in vrijwel alle landen als basis voor de wetgeving op het gebied van de stralingshygiëne.
De eerste aanbevelingen, die dateren van 1928, hadden evenals die van 1931, 1934 en 1937 betrekking op de bescherming van personen die met röntgentoestellen of radiumbronnen werken. In 1950 werd het werkterrein van de commissie uitgebreid tot andere bronnen van ioniserende straling. De normen aanbevolen na die tijd betroffen niet alleen degenen die met de bronnen werkten, maar ook individuele leden van de bevolking en de bevolking als geheel. Ook werden afgeleide normen gepubliceerd in de vorm van maximaal toelaatbare concentraties voor radioactieve stoffen in lucht en in drinkwater.

In 1977 heeft de ICRP nieuwe normen gepubliceerd, die op een aantal punten belangrijk afwijken van voorgaande normen. Over de betekenis hiervan voor de wetgeving en de praktische stralingsbescherming zijn nationaal en internationaal nog discussies gaande. Voor de ICRP zelf betekenen de nieuwe normen dat een aantal afgeleide normen, zoals die voor de opname van radionucliden in het lichaam, herzien moesten worden, een herziening die ook in verband met nieuwe gegevens over het gedrag van radionucliden in het lichaam gewenst was.

Uitgangspunten van ICRP-basisnormen

In de periode vóór 1956 werden toelaatbare niveaus van blootstelling aan ioniserende straling uitgedrukt in een dosis ontvangen in het betrekkelijk korte tijdsbestek van één dag of één week. Basis voor de toen aanbevolen norm was de ervaring dat bij matige therapeutische doses zichtbare huideffecten zich binnen enkele maanden herstelden en dat late effecten (huidkanker) later optraden naar mate de dosis lager was. Bij de toen aanbevolen norm voor beroepshalve blootgestelden (0,3 rem per week) werd impliciet verondersteld dat bij dit dosistempo directe effecten niet zouden optreden en dat late effecten gedurende het leven van de bestraalde persoon niet tot uiting zouden komen. Men ging dus uit van een drempeldosisconcept. De aanbevolen weekdosis werd 'tolerantiedosis' genoemd.
Toen er meer inzicht werd verkregen in de late en genetische effecten van straling en er meer personen werden blootgesteld aan kunstmatige stralingsbronnen met meer doordringende straling, werd het duidelijk dat niet langer volstaan kon worden met een limiet voor het dosistempo bij de blootstelling, maar dat ook grenzen gesteld moesten worden aan de over een langere periode geaccumuleerde dosis. Voor late effecten werd het drempeldosisconcept toen verlaten. Uitgegaan werd van een lineair verband tussen dosis en effect, zonder drempelwaarde.
In de aanbevelingen van 1959 werd door de ICRP een 'maximaal toegestane dosis' (MTD) geadviseerd voor een periode van 13 opeenvolgende weken. Er werden vier groepen organen of weefsel onderscheiden waarvoor verschillende MTD's werden aanbevolen. Voor de meest gevoelige groep, waartoe de bloedvormende organen,

de geslachtsorganen en de ooglens behoorden, werd voor radiologische werkers een MTD van 3 rem per 13 weken aanbevolen. Voor deze groep organen werd bovendien aanbevolen de totaal geaccumuleerde dosis te beperken tot 5 (N-18), waarin N de leeftijd van de betrokken persoon is. Dit komt dus neer op een gemiddelde dosis van 5 rem per jaar. Voor leden van de bevolking werden MTD's per 13 weken aanbevolen die ééntiende bedragen van die voor radiologische werkers. Bovendien werd in verband met genetische risico's voor de bevolking als geheel een gemiddelde individuele gonadendosis van maximaal 5 rem per generatie aanbevolen.

De maximaal toegestane dosis uit de aanbevelingen van 1959 werd door de ICRP omschreven als 'een dosis die in het licht van de huidige kennis, een verwaarloosbare kans meebrengt op ernstige somatische of genetische schade'. Dit standpunt van een grens beneden welke men zich geen zorgen hoefde te maken, werd in 1966 verlaten door invoering van het risicoconcept. Bij dit concept wordt uitgegaan van de voorzichtige veronderstelling dat iedere blootstelling aan straling een zeker risico kan opleveren, waarvan de grootte afhankelijk is van de grootte van de geaccumuleerde dosis, ook voor zeer lage waarden hiervan.

Deze veronderstelling houdt in dat er geen volledig veilige dosis bestaat. Bij steeds kleiner wordende doses wordt de kans dat late effecten optreden wel steeds kleiner, maar het risico wordt niet nul. De ICRP beveelt daarom aan bij iedere activiteit die blootstelling aan straling tot gevolg heeft, de daarbij ontvangen stralingsdoses zodanig te beperken dat het veronderstelde risico hiervan acceptabel is voor het individu en de maatschappij, gezien het nut van de desbetreffende activiteit. De rechtvaardiging van een zekere blootstelling zou dus plaats moeten vinden door het afwegen van de voordelen of de noodzaak van de desbetreffende activiteit tegen het risico dat verbonden is aan de hiermee gepaard gaande blootstelling aan straling. De ICRP was echter van mening dat op dat moment (1965) het verband tussen dosis en risico niet voldoende nauwkeurig bekend was om deze afweging kwantitatief mogelijk te maken.

De aanbevelingen van 1966 bevatten dosislimieten die niet essentieel afwijken van die van 1956. Er worden weer vier iets gewijzigde groepen organen of weefsels genoemd. De dosislimieten die voor de verschillende groepen worden aanbevolen zijn nu voor een periode van één jaar, terwijl voor een kwartaal de helft van een jaardosis is toegestaan. De 5(N-18) formule voor de geaccumuleerde dosis werd gehandhaafd voor de bloedvormende organen en de geslachtsorganen van radiologische werkers. De noodzaak om onnodige bestralingen te vermijden wordt in deze aanbevelingen verwoord door de toevoeging dat de ontvangen stralingsdoses zo laag gehouden dienen te worden als op grond van economische en sociale overwegingen redelijkerwijs kan worden gerealiseerd. (*As Low As Reasonably Achievable,* ALARA-principe).

In de periode tussen 1966 en 1977 is veel nieuwe informatie beschikbaar gekomen over de inductie van late effecten door ioniserende straling. Voor de ICRP was dit aanleiding haar standpunt betreffende de mogelijkheid, het risico dat verbonden is aan een zekere blootstelling voldoende nauwkeurig vast te kunnen stellen, te herzien. Op grond van de toen beschikbare gegevens werd het mogelijk geacht bij een bekende stralingsbelasting de grootte van de kans op late effecten te berekenen. Het werd daardoor mogelijk het afwegen van risico tegen voordeel en het zo laag mogelijk houden van doses meer te kwantificeren.

De basis voor de aanbevelingen van 1977 vat de ICRP samen in de volgende drie principes:

a. een activiteit die een zekere stralingsbelasting tot gevolg heeft, is alleen gerechtvaardigd als het nut van deze activiteit opweegt tegen het risico dat verbonden is aan deze stralingsbelasting;

b. alle stralingsdoses dienen zo laag te worden gehouden als op grond van sociale en economische overwegingen verantwoord is;

c. de stralingsdoses die individuen ontvangen mogen niet hoger zijn dan de aanbevolen dosislimieten.
Van deze drie voorwaarden is de eerste nieuw, hoewel aanduidingen in oudere publicaties, dat onnodige bestralingen vermeden moeten worden, wel in dezelfde richting wijzen. De tweede voorwaarde is het oude ALARA-principe, nu echter gekwantificeerd. De dosislimieten tenslotte vormen niet meer het voornaamste uitgangspunt van de aanbevelingen, maar zijn meer een randvoorwaarde bij de risicobaten-analyse (a) en de optimalisering van de bescherming tegen straling (b).

De ICRP-aanbevelingen van 1977

In deze aanbevelingen worden de schadelijke effecten van ioniserende straling op de mens verdeeld in stochastische en niet-stochastische effecten. Stochastische effecten zijn effecten waarbij er een zekere kans is dat ze optreden. De grootte van deze kans, maar niet de ernst van het effect, is afhankelijk van de grootte van de ontvangen stralingsdosis. Tot deze effecten behoren erfelijke afwijkingen in het nageslacht en alle soorten kwaadaardige nieuw-vormingen (kanker). Niet-stochastische effecten zijn effecten waarbij de ernst van het effect wèl afhangt van grootte van de dosis. Beneden een zekere drempeldosis treden ze niet op. Tot deze effecten behoren alle soorten celbeschadigingen die, als ze in voldoende aantallen in een orgaan of weefsel optreden, het functioneren van dat orgaan of weefsel belemmeren.
Het doel van de stralingshygiëne is nu de stralingsbelasting zodanig te beperken dat niet-stochastische effecten worden voorkomen en de berekende kans op stochastische effecten tot een aanvaardbare waarde wordt beperkt. De stochastische effecten die het gevolg zijn van blootstelling van de mens aan doses ioniserende straling die liggen beneden de in de stralingshygiëne gehanteerde dosislimieten, zijn niet of zeer moeilijk aan te tonen. De reden hiervan is dat dezelfde effecten, tumorinductie en genetische schade, ook spontaan of door andere oorzaken voorkomen en wel in veel sterkere mate. Het eventuele effect van de stralingsbelasting verdrinkt daardoor meestal geheel in de variaties die optreden in het aantal gevallen dat spontaan of door andere oorzaken voorkomt. Gegevens over het effect van kleine stralingsdoses moeten daarom worden verkregen door extrapolatie van gegevens over de effecten bij veel hogere doses.
Om de kans op stochastische effecten te berekenen gaat de ICRP voor het lage dosisgebied uit van een drempelloze, lineaire dosis-effect-relatie. Dit houdt in dat verondersteld wordt dat ook voor zeer kleine doses er een kleine, met de dosis evenredige, kans op een effect overblijft. Voor lage doses en een laag dosistempo is dit een aannemelijke veronderstelling, die eerder een overschatting dan een onderschatting oplevert. Wel heeft de ICRP bij de keuze van de evenredigheidsfactoren getracht overschatting zoveel mogelijk te voorkomen.
De totale kans op sterfte door kanker geïnduceerd door straling, wordt door de ICRP gemiddeld voor beide geslachten en alle leeftijden geschat op circa 10^{-4} per rem bij uniforme bestraling van het lichaam. Dat wil dus zeggen dat wanneer men een dosis van 1 rem heeft ontvangen, de kans op sterfte aan kanker als gevolg hiervan, 1 op 10.000 bedraagt. Wanneer ook de genetische risico's in twee generaties na de bestraling worden meegerekend, dan wordt het geschatte totale stochastische risico circa $1{,}4.10^{-4}$ per rem. Om het totaal stochastisch risico ook bij niet-uniforme lichaamsbestraling in één getal te kunnen uitdrukken heeft de ICRP een nieuwe grootheid ingevoerd, het *effectieve dosisequivalent* (H_E) dat gedefiniëerd is als:

$$H_E = \Sigma_T(W_T.H_T)$$

Hierin is H_T het dosisequivalent voor het orgaan T en w_T de weegfactor voor dat

orgaan. De door ICRP aanbevolen weegfactoren, die in tabel I staan vermeld, zijn afgeleid uit de relatieve gevoeligheid van de organen en weefsels voor inductie van stochastische effecten. De weegfactoren zijn zodanig genormeerd dat bij een niet-uniforme lichaamsbestraling met een H_E van 1 rem, de totale kans op een stochastisch effect even groot is als bij een homogene lichaamsbestraling van 1 rem.

Tabel I. ICRP-weegfactoren.

orgaan	w_T
geslachtsorganen	0,25
borstklieren	0,15
rode beenmerg	0,12
longen	0,12
schildklier	0,03
botoppervlak	0,03
overige vijf meest bestraalde organen	0,03 (5 × 0,06)

Een andere nieuwe grootheid is het *collectieve effectieve dosisequivalent* voor een groep personen. Hieronder wordt verstaan de som van alle effectieve dosisequivalenten van de personen in de groep. Deze grootheid is van belang, omdat door vermenigvuldiging van deze dosis met het risico per rem, het totale aantal gevallen van stochastische effecten wordt verkregen dat in deze groep kan worden verwacht. De eenheid voor collectieve dosis is de manrem, in SI-eenheden de mansievert.

De dosislimieten

Ook in de ICRP-aanbevelingen van 1977 wordt de stralingsbelasting van een individu aan grenzen gebonden. Deze grenzen, die betrekking hebben op een periode van een jaar, worden nu dosislimieten genoemd. Deze limieten zijn niet van toepassing op bestralingen voor medische doeleinden.

Bij het vaststellen van de dosislimieten is de ICRP weer uitgegaan van het risicoconcept. Voor beroepshalve blootgestelde personen, de radiologische werkers, wordt het aanvaardbare risico vastgesteld door het risico van de stralingsbelasting te vergelijken met de kans op een ongeval met dodelijke afloop in andere beroepen met een hoge standaard van veiligheid. Bij de oude dosislimiet van 5 rem per jaar voor homogene lichaamsbestraling is in de praktijk gebleken dat de gemiddelde dosis van grotere groepen radiologische werkers niet meer bedraagt dan 0,5 rem per jaar, omdat rekening gehouden wordt met het ALARA-principe. Wordt uitgegaan van een risicogetal van $1{,}4.10^{-4}$ per rem dan komt deze gemiddelde stralingsbelasting overeen met een gemiddelde kans op een dodelijk stochastisch effect van $0{,}7.10^{-4}$ per jaar. Dit is van dezelfde orde als de kans op een ongeval met dodelijke afloop in een veilig beroep, die circa 10^{-4} per jaar bedraagt. Op grond van deze vergelijking komt de ICRP tot de conclusie dat voor radiologische werkers een maximum van 5 rem per jaar voor de effectieve dosisequivalent H_E acceptabel is.

Bij inhomogene lichaamsbestraling kan bij een H_E van 5 rem, gezien de waarden van de gewichtsfactoren, plaatselijk een aanzienlijk hogere dosis voorkomen. Omdat niet-stochastische effecten dan niet geheel uitgesloten kunnen worden, stelt de ICRP als extra voorwaarde dat in geen enkel orgaan of weefsel van het lichaam de dosis meer mag bedragen dan 50 rem per jaar. Voor de ooglens wordt deze niet-stochastische limiet op 15 rem per jaar gesteld.

Voor leden van de bevolking beveelt de ICRP dosislimieten aan die ééntiende bedragen van die voor radiologische werkers. Ook deze limieten zijn afgeleid door de

berekende stralingsrisico's te vergelijken met andere risico's waaraan leden van de bevolking blootstaan. Vastgesteld wordt dat bij hantering van een maximumwaarde voor H_E van 0,5 rem per jaar voor een individueel lid van de bevolking, de gemiddelde dosis voor een bevolkingsgroep zeker tien- tot honderdmaal lager zal liggen. Het hiermee corresponderende risico van 10^{-5} à 10^{-6} per jaar is van dezelfde orde van grootte als andere risico's die door een individu in de praktijk van het dagelijks leven regelmatig worden aanvaard.
In tabel II zijn de dosislimieten voor individuen nog eens samengevat, nu uitgedrukt in de door ICRP gebruikte eenheid sievert (Sv), met tussen haakjes de waarde in rem.

Tabel II. ICRP-dosislimieten 1977.

	radiologisch werker	lid bevolking
stochastisch:		
$\Sigma(w.H)_T$	< 50 mSv (5 rem)	< 5 mSv (0,5 rem)
niet-stochastisch:		
ooglens	< 0,15 Sv (15 rem)	< 15 mSv (1,5 rem)
overige organen	< 0,5 Sv (50 rem)	< 50 mSv (5 rem)

Afgeleide limieten

Uit de besproken dosislimieten kunnen een aantal secundaire limieten worden afgeleid. De voornaamste hiervan zijn die voor interne bestraling van de mens, waarvan sprake is als radioactief materiaal in het lichaam wordt opgenomen. Als belangrijkste innemingsroutes worden beschouwd 'inhalatie' als het radioactieve materiaal zich in de lucht bevindt en 'ingestie' als voedsel of drinkwater met radioactief materiaal is verontreinigd.
In de ICRP-aanbevelingen van 1959 (ICRP-2) worden de limieten voor interne bestraling door radionucliden gegeven als 'maximaal toegestane concentraties' (MTC's) in lucht en in drinkwater. Deze gelden voor continue blootstelling van een volwassen 'standaard'-mens.
Bij het vaststellen van deze MTC's is gebruik gemaakt van het volgende rekenmodel. Ingeademd of ingeslikt radioactief materiaal verdeelt zich volgens een voor het desbetreffende materiaal kenmerkende verdeelsleutel over de organen in het lichaam. Uit ieder orgaan wordt het materiaal daarna weer afgevoerd met een voor dat orgaan karakteristieke snelheid, die bepaald wordt door de stofwisselingsprocessen in het lichaam en het fysische verval van het radionuclide. Bij een constante toevoer zal er een evenwichtssituatie ontstaan, waarbij in ieder orgaan van het lichaam een constante hoeveelheid van het radionuclide aanwezig is. Voor deze situatie wordt nu voor ieder orgaan het gemiddelde dosistempo berekend op grond van de door radioactief verval per tijdseenheid aan dat orgaan afgegeven hoeveelheid energie. Nagegaan wordt vervolgens bij welke constante toevoer het dosistempo in het meest beperkende (kritische) orgaan juist gelijk is aan wat voor dat orgaan maximaal toelaatbaar is. De MTC is dan de met deze toevoer corresponderende concentratie in lucht of in drinkwater waarbij voor berekening van de MTC wordt uitgegaan van een standaard-gebruik van lucht en water.
In de nieuwe ICRP-aanbevelingen worden limieten voor inwendige bestraling gegeven als *Annual Limits of Intake* (ALI's). Bij het berekenen van de ALI gaat de ICRP uit van een enkelvoudige inname van het radioactieve materiaal. Berekend worden nu de doses die de organen in het lichaam ontvangen in een periode van

vijftig jaar volgend op de eenmalige inhalatie of ingestie. De aldus verkregen vijftig jaar volgdoses $H_{50,T}$ worden nu vermenigvuldigd met de bijbehorende gewichtsfactoren w_T van tabel I en opgeteld, waarmee de effectieve dosisequivalent $H_{50,E}$ is verkregen. De ALI is nu gedefiniëerd als die hoeveelheid activiteit die na inname een $H_{50,E}$ veroorzaakt van 5 rem, de dosislimiet voor één jaar (tabel II). Deze definitie houdt dus in dat inademen van één inhalatie-ALI of inslikken van één ingestie-ALI een evengroot stochastisch risico oplevert als een homogene externe bestraling van 5 rem.

Bij een aantal radionucliden zal bij een inname die een $H_{50,E}$ oplevert van 5 rem de $H_{50,T}$ in één der organen groter zijn dan de stochastische limiet voor één jaar van 50 rem. Dit kan met name het geval zijn bij radionucliden die voor een belangrijk deel terecht komen in organen met een kleine gewichtsfactor w_T, zoals de schildklier en het bot. In deze gevallen wordt naast de stochastische ALI ook een niet-stochastische ALI berekend. Deze laatste is gedefiniëerd als die inhalatie of ingestie waarbij de $H_{50,T}$ in het orgaan met de hoogste dosis juist 50 rem bedraagt.

De delen I, II en III van ICRP-publicatie 30 bevatten de ALI-waarden van de radionucliden voor in totaal 94 chemische elementen. In tabel III is een aantal hiervan vermeld.

Tabel III illustreert duidelijk dat de ALI-waarden van radionucliden grote verschillen vertonen. Zo is bijvoorbeeld de inhalatie-ALI van natrium-24 één miljoen maal groter dan die van plutonium-239. Dit betekent dus dat bij inademing van dezelfde hoeveelheid, uitgedrukt in becquerel (Bq), het stochastische risico voor plutonium-239 één miljoen maal groter is dan voor natrium-24. Deze grote verschillen worden voor een belangrijk deel veroorzaakt door de verschillen in verblijftijd van in het lichaam opgenomen radioactief materiaal. Ook de wijze van verdeling over de organen in het lichaam en de kwaliteitsfactor van de door het materiaal uitgezonden straling spelen hierbij een rol.

Tabel III. *Annual Limit of Intake* voor een aantal radionucliden.

nuclide:	ALI in Bq	
	ingestie	inhalatie
^{3}H*)	3.10^{9}	3.10^{9}
^{24}Na	1.10^{8}	2.10^{8}
^{32}P	2.10^{7}	3.10^{7}
^{35}S	4.10^{8}	6.10^{8}
^{54}Mn	2.10^{8}	6.10^{8}
^{59}Fe	3.10^{7}	1.10^{7}
^{60}Co	7.10^{6}	6.10^{6}
^{90}Sr	1.10^{6}	7.10^{5}
^{131}J	1.10^{6}	2.10^{6}
^{137}Cs	4.10^{6}	6.10^{6}
^{210}Pb	2.10^{4}	9.10^{3}
^{210}Po	1.10^{5}	2.10^{4}
^{226}Ra	7.10^{4}	2.10^{4}
^{232}Th	3.10^{4}	4.10^{1}
^{237}Np	3.10^{3}	2.10^{2}
^{238}U	5.10^{5}	5.10^{4}
^{239}Pu	2.10^{5}	2.10^{2}
^{241}Am	5.10^{4}	2.10^{2}

*) Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368

Rechtvaardiging van de blootstelling aan straling

Omdat er van wordt uitgegaan dat iedere blootstelling aan ioniserende straling een zeker risico oplevert, moet steeds worden nagegaan of bij een toepassing of werkwijze die blootstelling aan straling tot gevolg heeft, het nut van deze toepassing of werkwijze wel opweegt tegen de risico's van de blootstelling. Het uitvoeren van deze risico-baten-analyse zal in vele gevallen niet eenvoudig zijn, omdat vaak ongelijksoortige grootheden tegen elkaar moeten worden afgewogen. Aan de positieve kant staan alle voordelen die de toepassing oplevert voor de maatschappij, zoals de waarde van produkt of voorziening, de werkgelegenheid, de energievoorziening, het opsporen van ziekten, het welzijn. Aan de negatieve kant staan alle kosten en risico's verbonden aan de toepassing of werkwijze, maar ook onmeetbare zaken, zoals angst voor straling. Het risico van de blootstelling aan straling kan hierbij kwantitatief worden bepaald uit de collectieve dosis die het gevolg is van deze blootstelling.

Optimalisering van de bescherming tegen straling

Bij iedere toepassing van stralingsbronnen die gerechtvaardigd is, zal ook nog moeten worden nagegaan of er op grond van economische en sociale overwegingen voldoende is gedaan om de stralingsbelasting van hierbij blootgestelde personen te beperken (ALARA-principe).

Deze optimaliseringsprocedure komt erop neer dat nagegaan moet worden in welke mate de collectieve dosis die het gevolg is van het toepassen van de stralingsbronnen kan worden verlaagd door extra voorzieningen of andere werkwijzen. De kosten van deze voorzieningen of werkwijzen dienen dan te worden afgewogen tegen de bereikbare dosisreductie. Deze afweging kan kwantitatief plaatsvinden als wordt vastgesteld welk bedrag maximaal mag worden uitgegeven voor het besparen van 1 manrem op de collectieve dosis. Het toekennen van een maximumwaarde aan de manrem betekent in feite dat wordt vastgesteld hoeveel de maatschappij bereid is te betalen voor vermindering van het berekende aantal slachtoffers van stochastische effecten.

Het klinkt onethisch de waarde van een mensenleven in geld uit te drukken. Men dient echter te bedenken dat dergelijke afwegingen in de praktijk van de besluitvorming meer voorkomen. Zo wordt een bedrag vastgesteld dat besteed mag worden aan verbetering van de verkeersveiligheid. Bij het vaststellen van een dijkhoogte worden de kosten afgewogen tegen de grootte van de kans op dijkbreuk. Het toekennen van een waarde aan de manrem moet dan ook worden gezien als een methode om te voorkomen dat onevenredig veel middelen worden besteed aan de verdere vermindering van individueel reeds geringe stralingsrisico's. Dit gaat immers ten koste van het terugdringen van andere risico's die de mens bedreigen, waarvoor met dezelfde middelen misschien aanmerkelijk meer resultaat kan worden bereikt.

Literatuur

Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, ICRP Publication 2, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1959.

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9, 1965.

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, *Annals of the ICRP*, volume 1, nr. 2, 1977.

Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30, Part I, II and III, *Annals of the ICRP*, Volume 2, nr. 3/4, 1979; Volume 4, nr. 3/4, 1980, Volume 6, nr. 2/3, 1981

12. DE ACHTERGROND-STRALING IN HET MILIEU VAN DE MENS

C.E. Rasmussen

De natuurlijke omgeving is radioactief, waardoor de mens bloot staat aan ioniserende straling – ook als er geen sprake zou zijn van kerntechniek. De natuurlijke straling geeft een referentiekader aan, waarbinnen de straling ten gevolge van de kerntechniek beoordeeld kan worden. Hij wordt veroorzaakt door nog onbekende processen in de kosmos en door het radioactief verval van atoomkernen in de atmosfeer, in de zeeën en, vooral, in de bodem. Aangezien deze kernen ten dele door inademing, drinken en eten in het menselijk lichaam opgenomen worden, leiden ze niet alleen tot uitwendige bestraling, maar ook tot inwendige bestraling. De laatste levert zelfs een dubbel zo grote dosis als de eerste. Gemiddeld ontvangt een Nederlander zo ieder jaar een dosis van bijna 0,002 sievert. In een aantal streken is de jaardosis aanzienlijk hoger, meestal als gevolg van een sterkere radioactiviteit van de bodem. Menselijke activiteiten die niets te maken hebben met de kerntechniek maken dat aan deze natuurlijke stralingsdosis gemiddeld nog eens een kwart wordt toegevoegd. De toepassing van ioniserende straling voor medisch onderzoek is daar verreweg de grootste van. De straling van bouwmaterialen van woningen is niet verwaarloosbaar, terwijl ook het stoken van fossiele brandstoffen de radioactiviteit van de omgeving vergroot.

Inleiding

Ioniserende straling is altijd aanwezig geweest in het natuurlijke milieu van de mens. De aarde staat onophoudelijk bloot aan straling vanuit de wereldruimte. Deze kosmische straling heeft onder meer tot gevolg dat in de atmosfeer en op de aarde zelf voortdurend radioactieve nucliden (kosmogenische nucliden) ontstaan. Voorts bevat de aardkorst langlevende radioactieve nucliden, die reeds vanaf het ontstaan van de aarde aanwezig zijn geweest (primordiale nucliden). Deze veroorzaken bij het aardoppervlak de zogenaamde terrestrische straling. Kosmogenische en primordiale nucliden geraken via de voedselketen en via de ingeademde lucht in het menselijk lichaam. De invloed van sommige van bovengenoemde natuurlijke stralingsbronnen op de hoeveelheid straling waaraan de mens blootstaat wordt versterkt door bepaalde voortbrengselen van de menselijke beschaving, zoals vliegreizen en diverse bouwmaterialen. Men spreekt in dit verband van *technologically enhanced natural radiation* (door de technologie versterkte natuurlijke straling).

Naast radioactieve nucliden van natuurlijke oorsprong kunnen in het menselijk leefmilieu een aantal radionucliden worden aangetroffen, die zijn ontstaan bij militaire, industriële en andere activiteiten van de mens. Hiervan is in de huidige omstandigheden de *fall-out*, veroorzaakt door kernwapenproeven in de atmosfeer, het belangrijkst voor de Nederlandse bevolking als geheel.

In dit verband mag niet onvermeld blijven dat de medische röntgendiagnostiek van alle toepassingen van ioniserende straling de grootste bijdrage tot de totale bevolkingsdosis levert. Deze benadert de dosis, welke door de natuurlijke achtergrondstraling wordt veroorzaakt.

Kosmische straling

Vanuit het heelal dringt straling met hoge energie de aardatmosfeer binnen. Deze straling, die primaire kosmische straling wordt genoemd, vindt zijn oorsprong grotendeels in ons melkwegstelsel. Een deel hiervan is afkomstig van de zon, die vooral tijdens perioden van grote zonnevlamactiviteit veel straling uitzendt.

Door wisselwerking van de primaire kosmische straling met de atoomkernen in de atmosfeer ontstaat de zogenaamde secundaire kosmische straling, die een belangrijke bijdrage aan de natuurlijke achtergrondstraling nabij het aardoppervlak levert.

Primaire kosmische straling

De uit het heelal afkomstige kosmische straling bestaat voor het grootste deel uit protonen (ca. 87%) en alfadeeltjes (ca. 11%). Daarnaast worden zwaardere atoomkernen, elektronen, fotonen en neutrino's aangetroffen. In deze galactische kosmische straling komen deeltjes voor met verbazingwekkend hoge energie (tot boven 10^{20}eV), waarvoor nog geen eenduidige verklaring voorhanden is (1). Het energiespectrum vertoont een piek in de buurt van 300 MeV per deeltje. Men neemt aan dat een niet onbelangrijk deel van deze straling, en vermoedelijk alle straling met energie boven 10^{17}eV per deeltje, afkomstig is van bronnen die zich buiten ons melkwegstelsel bevinden.

Binnen ons zonnestelsel wordt het galactische stralingsveld beïnvloed door de magnetische velden die veroorzaakt worden door de activiteit van de zon. Het magnetische veld van de aarde veroorzaakt eveneens een zekere afbuiging van de geladen deeltjes, waardoor op geringere geografische breedte de aardatmosfeer steeds moeilijker bereikbaar wordt voor deeltjes met lagere energie. De zon zendt een voortdurende stroom geladen deeltjes uit (de zonnewind), die door hun betrekkelijk lage energie de bovenste lagen van de aardatmosfeer niet kunnen bereiken.

Daarnaast worden vanuit zonnevlammen kortstondig veel fotonen en geladen deeltjes van hogere energie uitgezonden. Deze solaire kosmische straling draagt echter door haar betrekkelijk lage deeltjesenergie weinig bij tot het stralingsniveau in de onderste lagen van de aardatmosfeer.

Secundaire kosmische straling

De primaire kosmische straling wordt in de bovenste paar honderd g cm^{-2}*) van de aardatmosfeer zeer sterk verzwakt (de totale dikte van de atmosfeer bedraagt ca. 1.000 g cm^{-2}). Als gevolg van interacties met de elektronen van atmosferische atomen en moleculen (ionisatie en excitatie) verliest de primaire straling energie. Daarnaast vinden reacties plaats met de atoomkernen. De secundaire straling die hierdoor ontstaat (voornamelijk neutronen, protonen en π-mesonen) veroorzaakt door opeenvolgende interacties en verval van onstabiele reactieprodukten een zogenaamde cascade van geladen en ongeladen deeltjes en fotonen. In de onderste lagen van de atmosfeer is de kosmische straling vrijwel geheel secundair van aard en bestaat zij voornamelijk uit elektronen, protonen, neutronen en de zeer doordringende μ-mesonen.

Op zeeniveau in Nederland resteren vrijwel alleen elektronen en μ-mesonen. De μ-mesonen zijn instabiel en gaan na enkele microseconden over in elektronen.

Stralingsgordels

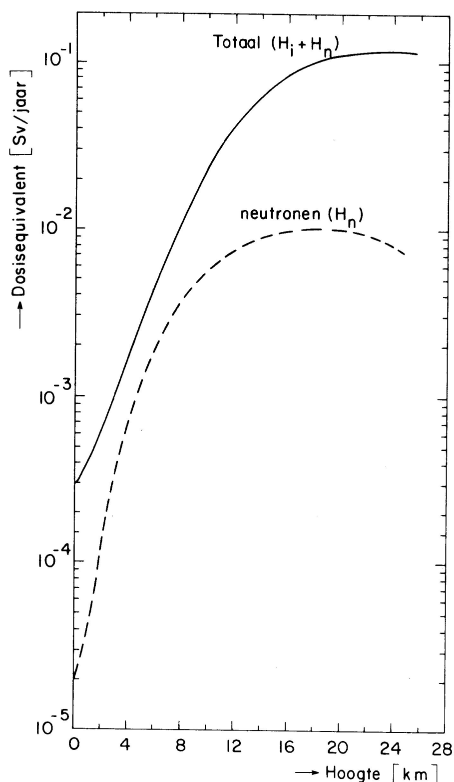
Op vele duizenden kilometers boven het aardoppervlak bevinden zich op verschil-

*) In de stralingshygiëne is het gebruikelijk de hoeveelheid materie tussen waarnemingspunt en stralingsbron uit te drukken in g cm^{-2} (gram per vierkante centimeter) of kg m^{-2}, die het produkt zijn van lineaire dikte (cm) en dichtheid (g cm^{-3}).

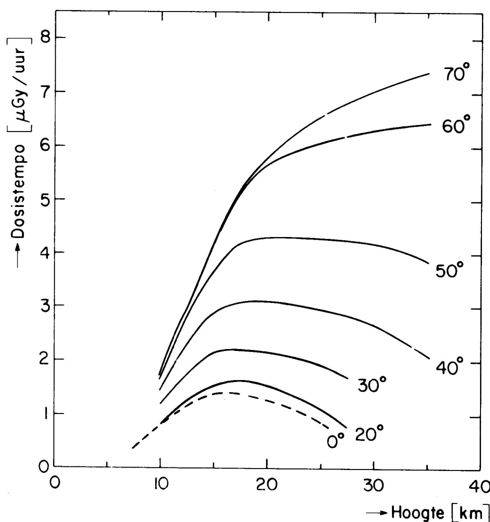
lende hoogten een tweetal stralingsgordels van geladen deeltjes, die zijn gevangen in het magnetisch veld van de aarde. De oorsprong van de gevangen deeltjes (protonen, elektronen en een kleine fractie alfadeeltjes) in deze 'Van Allen-gordels' is niet goed bekend. Er wordt gesuggereerd dat de protonen in de binnenste gordel zijn ontstaan door het uiteenvallen van neutronen uit de secundaire kosmische straling. De stralingsgordels hebben geen invloed op de achtergrondstraling in de buurt van het aardoppervlak.

Dosistempo veroorzaakt door kosmische straling

Het dosistempo in de atmosfeer als gevolg van de direct ioniserende component van de kosmische straling (de geladen deeltjes) kan worden afgeleid uit de luchtionisatie. Deze moet worden bepaald op een plaats waar de invloed van de terrestrische straling te verwaarlozen is, zoals boven een voldoende groot en diep water. Het dosis(equivalent)tempo veroorzaakt door de neutronencomponent moet afzonderlijk worden bepaald. Tussen de ionisatiedichtheid I vrij in lucht (aantal ion-elektronparen per cm^3 en per seconde bij standaard-temperatuur en -druk) en het dosistempo $\dot{D}_a$ in lucht geldt de relatie: $I = 1$ correspondeert met $\dot{D}_a$ = $1{,}5 \times 1^{-8}$Gy* per uur. Hieruit is het dosisequivalenttempo $\dot{H}_i$ voor de ioniserende component te berekenen (op zeeniveau mag een kwaliteitsfactor 1 worden gebruikt). Voor de geografische breedte van Nederland wordt op zeeniveau een



Figuur 1
Gemiddeld jaardosisequivalent ten gevolge van kosmische straling op de geografische breedte van Nederland, als functie van de hoogte boven zeeniveau.



Figuur 2
Gemiddeld dosistempo ten gevolge van kosmische straling als functie van de hoogte boven zeeniveau, voor verschillende geografische breedten.

* Gy = gray, de eenheid waarin de door de materie geabsorbeerde dosis stralingsenergie wordt uitgedrukt.

gemiddelde waarde van 2,1 per cm^3 en per seconde voor I gevonden (2), waaruit volgt dat het dosisequivalent H_i per jaar op zeeniveau gemiddeld 2,8 × 10^{-4} Sv** bedraagt. Op grotere hoogte neemt H_i sterk toe (zie figuur 1). De variatie van H_i met de geografische breedte is te zien in figuur 2.
Het gemiddelde jaarlijkse dosisequivalent H_n, veroorzaakt door de indirect ioniserende neutronencomponent, is eveneens in figuur 1 weergegeven. In Nederland bedraagt het totale dosisequivalent (H_i + H_n) in de open lucht op zeeniveau ca. 3 × 10^{-4} Sv per jaar. In gebouwen wordt de kosmische straling gedeeltelijk afgeschermd, waardoor genoemd jaardosisequivalent voor de gemiddelde Nederlander naar schatting met 20% wordt gereduceerd. Uit de figuren is tevens bij benadering af te leiden, welk extra dosisequivalent zou voortvloeien uit een verblijf in het hooggebergte of een vliegreis op grote hoogte (zie ook *Natuurlijke stralingsbronnen en technologische ontwikkeling*, blz. 160).

Kosmogenische radionucliden

De talrijke kosmogenische radionucliden in de biosfeer dragen slechts in zeer geringe mate bij tot de stralingsdosis, afkomstig van natuurlijke bronnen. Van deze nucliden zijn koolstof-14, natrium-22, beryllium-6 en tritium (^3H) het belangrijkst uit een oogpunt van stralingshygiëne. Enkele gegevens hierover zijn vermeld in tabel I.

Tabel I. Belangrijkste kosmogenische nucliden.

	^3H	^7Be	^{14}C	^{22}Na
Halveringstijd (jaren)	12,3	0,15	5.730	2,62
Hoeveelheid op aarde, inclusief atmosfeer (Bq)*	1,3×10^{18}	3,7×10^{16}	8,5×10^{18}	4×10^{14}
Percentage hiervan in:				
stratosfeer	6,8	60	0,3	25
troposfeer	0,4	11	1,6	1,7
aardoppervlak en biosfeer	27	8	4	21
oceanen-menglaag	35	20	2,2	44
oceanen-diepe lagen en sedimenten	30	0,2	92,4	8
Effectief dosisequivalent (Sv/jaar)	10^{-8}	8×10^{-8}	8×10^{-6}	2×10^{-7}

* Bq= becqerel; zie Aanhangsel, blz. 356

De nucliden tritium en koolstof-14 komen ook door menselijke activiteiten in aanmerkelijke hoeveelheden vrij in het milieu; de in tabel I vermelde waarden hebben alleen betrekking op het gedeelte van kosmogenische oorsprong. Deze nucliden ontstaan grotendeels in de atmosfeer door interactie van neutronen met stikstof. Het tritium wordt omgezet in getritieerd water en opgenomen in de waterkringloop. Voor het begin van de proefexplosies van kernwapens bedroeg de tritiumconcentratie in continentaal oppervlaktewater 200 - 900 Bq per m^3 en ca. 100 Bq per m^3 in zeewater. Daarna zijn deze concentraties aanmerkelijk gestegen, hoofdzakelijk als gevolg van de kernwapenproeven (zie *Fall-out*, blz. 159).
Het koolstof-14 van kosmogenische oorsprong dat door de levende organismen in hun moleculen wordt ingebouwd, veroorzaakt een specifieke activiteit van ca. 230Bq per kg koolstof in biologische materialen. De specifieke activiteit in de lucht is in de loop van deze eeuw gedaald, als gevolg van de lozing van kooldioxyde bij de verbranding van fossiele brandstoffen die een laag gehalte aan koolstof-14 bevatten.

** Sv = sievert, de eenheid waarin het dosisequivalent wordt uitgedrukt.

Door het oplossen van atmosferisch kooldioxyde in het zeewater, waarna het langlevende koolstof-14 in ionvorm geleidelijk naar grotere diepten wordt verplaatst, worden de diepe oceaanlagen en sedimenten de belangrijkste opslagplaats van het kosmogenische koolstof-14 (zie tabel I). De kernwapenproeven hebben een aanmerkelijke verhoging van de concentratie van koolstof-14 in de troposfeer veroorzaakt (zie *Fall-out*, blz. 159).

Terrestrische straling

In de aardkorst bevinden zich radioactieve nucliden die daar altijd aanwezig zijn geweest. Behalve nucliden van kosmogenische oorsprong treft men er nucliden aan met zeer lange halveringstijden (miljarden jaren). Deze laatste moeten daar sinds het ontstaan van de aarde (ca. vijf miljard jaar geleden) aanwezig zijn geweest, en worden daarom primordiale nucliden genoemd. Sommige van deze nucliden gaan bij radioactief verval direct over in een stabiel nuclide, maar andere hebben radioactieve dochterprodukten die eveneens in het milieu worden aangetroffen. Indien deze dochterprodukten andere fysische of chemische eigenschappen bezitten dan het moedernuclide, vertonen zij dikwijls ook een verschillend spreidingspatroon.
Tabel II geeft een overzicht van de primordiale nucliden die voor de stralingshygiëne het belangrijkst zijn. De overige primordiale nucliden zijn in dit opzicht van weinig betekenis vanwege hun geringe voorkomen, lange halveringstijd (d.w.z. lage activiteit per massa-eenheid) en/of onbeduidende stralingsemissie.

Tabel II. Overzicht van de belangrijkste primordiale nucliden op aarde.

Nuclide	Halveringstijd (jaren)	Gemiddelde activiteitsconcentratie in de aardkorst (Bq kg^{-1})	Totale activiteit in de aardkorst*) (Bq)
kalium-40	$1{,}26 \times 10^{9}$	370	$1{,}1 \times 10^{25}$
uranium-238	$4{,}5 \times 10^{9}$	25	$7{,}5 \times 10^{23}$
thorium-232	$1{,}4 \times 10^{10}$	25	$7{,}5 \times 10^{23}$
rubidium-87	$4{,}8 \times 10^{10}$	74	$2{,}2 \times 10^{24}$

*) Massa van de aardkorst gesteld op 3×10^{22} kg.

Activiteitsconcentraties in bodem, lucht en water

Bodem

De activiteitsconcentraties in diverse gesteenten en grondsoorten kunnen vrij sterk afwijken van de gemiddelde waarde die in tabel II is gegeven. In het algemeen bevatten stollingsgesteenten meer activiteit dan sedimentaire gesteenten. De activiteitsconcentraties in grondsoorten worden in eerste instantie bepaald door de gesteenten waaruit deze zijn ontstaan. Water is echter een belangrijk transportmechanisme waardoor de activiteitsconcentraties in de bodem in de loop der tijd kunnen veranderen.
Tabel III geeft enkele representatieve waarden voor de activiteitsconcentraties in diverse gesteenten en in grond.

Op bepaalde plaatsen in de wereld komen in de bodem aanmerkelijk hogere concentraties voor (zie *Doses veroorzaakt door primordiale nucliden*, blz. 158).

Tabel III. Representatieve waarden voor de activiteitsconcentraties van kalium-40, uranium-238, thorium-232 en rubidium-87 in gesteenten en grond.

	Activiteitsconcentratie (Bq kg^{-1})			
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	^{87}Rb
Stollingsgesteenten				
graniet	1.000	60	80	180
basalt	250	10	10	30
Sedimentaire gesteenten				
kalksteen	90	30	7	7
carbonaat	70	30	8	7
zandsteen	400	20	11	30-70
leisteen	700	45	45	110
Grond	100-700	10-50	7-50	50

Lucht

De nucliden uranium-238 en thorium-232 staan elk aan het begin van een vervalreeks van meer dan tien radioactieve nucliden, eindigend met een stabiel isotoop van lood. De radioactieve dochters van uranium-238 en thorium-232 hebben halveringstijden die alle aanmerkelijk korter zijn dan die van de twee moedernucliden. Indien alle radioactieve nucliden van zo'n reeks ter plaatse aanwezig blijven ontstaat daar na zekere tijd een evenwicht, waarbij van elk van de dochters evenveel activiteit aanwezig is als van het moedernuclide. Enkele elementen uit genoemde reeksen, met name radium (*Ra*) en het daaruit ontstane edelgas radon (*Rn*), vertonen echter chemische en fysische eigenschappen die nogal afwijken van de rest, waardoor zij zich gemakkelijker verspreiden en het plaatselijke evenwicht kan worden verstoord. Het radongas ontsnapt voor een deel uit de bodem (exhalatie), zodat de volgprodukten elders (meest in de lucht) worden gevormd. Het gemiddelde exhalatietempo van radon uit de bodem wordt geschat op 15 mBq $m^{-2}s^{-1}$ (per m^2 en per seconde) voor radon-222 (*radon*, halveringstijd 3,8 dagen, volgprodukt van uranium-238). Voor radon-220 (*thoron*, halveringstijd 55 seconden, volgprodukt van thorium-232) schat men het gemiddelde exhalatietempo op 1 Bq $m^{-2}s^{-1}$. Het exhalatietempo wordt onder meer beïnvloed door de bodemgesteldheid en de temperatuur. Mede omdat vanuit de oceanen relatief weinig radongas in de lucht komt, varieert in ons land het gehalte aan radon en zijn volgprodukten in de lucht sterk met de atmosferische condities (hogere concentratie bij stabiele atmosfeer en aflandige wind). Als representatieve concentratiewaarde geldt 3 Bq m^{-3} voor radon en thoron. Dezelfde of wat lagere waarden gelden voor hun volgprodukten, welke laatste zich veelal vasthechten aan luchtstofdeeltjes. Binnenshuis zijn deze concentraties veelal een orde van grootte hoger, zowel door het gehalte aan radium-226 voor bepaalde bouwmaterialen als de geringere ventilatie (2) (zie ook *Natuurlijke stralingsbronnen en technologische ontwikkeling*, blz. 160). In 'gewone' mijnen (geen uranium) zijn de gemiddelde concentraties van radon en zijn dochterprodukten doorgaans twee of drie orden van grootte hoger dan in de buitenlucht (2).

Water

Activiteitsconcentraties die gelden voor de Nederlandse wateren zijn samengevat in tabel IV.

Drinkwater gewonnen uit oppervlaktewater bevat gewoonlijk onbeduidende concentraties aan nucliden uit de uranium- en thoriumreeksen. Voor grondwater kunnen echter sterk uiteenlopende waarden worden gevonden. In sommige landen bevat het drinkwater plaatselijk een sterk verhoogde uraniumconcentratie (bijvoor-

beeld 10^5 Bq m^{-3} in bronwater uit Helsinki, Finland). Radon wordt in tal van landen in aanmerkelijke concentraties in het drinkwater aangetroffen. Terwijl deze waarde in Nederland gemiddeld minder dan 10^3 Bq m^{-3} bedraagt, vindt men in andere Europese landen gemiddelde concentraties die één tot drie orden van grootte hoger liggen. Water uit sommige minerale bronnen bevat zelfs concentraties van 10^5 tot 10^8 Bq m^{-3}.
Een hoge radonconcentratie in het drinkwater kan een belangrijk aandeel leveren in de radonconcentratie in de lucht in gebouwen.

Tabel IV. Activiteitsconcentraties van primordiale nucliden in zee, Nederlandse oppervlaktewateren en drinkwater (2, 6, 7).

Nuclide	Gemiddelde activiteitsconcentraties (Bq m^{-3})					
	zee	Rijn	Maas	W.Schelde	IJsselmeer	drinkwater Rotterdam
^{40}K	10.000		100			100
α-totaal		70	60	300	45	
^{226}Ra	2	4	3	45		

Doses veroorzaakt door primordiale nucliden

Straling uit de bodem
De jaardosis in lucht op één meter hoogte boven grond waarin zich kalium-40, uranium-238 en thorium-232 bevinden in bekende activiteitsconcentraties, kan worden berekend met behulp van de gegevens in tabel V. Er is alleen rekening gehouden met gammastraling (de andere uitgezonden stralingssoorten worden sterk door de grond geabsorbeerd). Het nuclide rubidium-87, dat alleen bètastraling uitzendt, speelt in dit verband geen rol.

Tabel V. Jaardosis in lucht op 1 m hoogte boven grond waarin zich 1 Bq kg^{-1} van de nucliden ^{40}K, ^{238}U of ^{232}Th bevindt (2).

Nuclide	Jaardosis (Gy per Bq kg^{-1})
^{40}K	$3{,}78 \times 10^{-7}$
^{238}U*)	$3{,}74 \times 10^{-6}$
^{232}Th*)	$5{,}80 \times 10^{-6}$

*) In de grond is volledig evenwicht met de dochterprodukten verondersteld.

Door combinatie van de gegevens vermeld in tabel II en III vindt men buitensh een gemiddelde jaardosis van $3{,}9 \times 10^{-4}$ Gy in lucht, op één meter hoogte boven grond, als gevolg van terrestrische straling. Radon, thoron en hun dochterprodukten in de buitenlucht voegen hieraan een bijdrage toe van naar schatting enkele procenten. De waarden die men in de praktijk vindt worden vrijwel geheel bepaald door de activiteitsconcentraties in de bovenste bodemlaag van 20 à 30 cm, vanwege de absorptie van de straling die in de bodem zelf plaatsvindt. In Nederland zijn op verschillende plaatsen in het vrije veld waarden tussen $4{,}1 \times 10^{-4}$ Gy en $8{,}5 \times 10^{-4}$ Gy (gemiddeld $5{,}4 \times 10^{-4}$ Gy) gemeten voor de jaardosis in lucht op één meter boven de grond (inclusief een bijdrage van de kosmische straling van ca. 3×10^{-4} Gy). De laagste waarde werd gevonden boven zandgrond, de hoogste boven klei. In ste-

delijke gebieden vindt men doorgaans een hoger dosistempo, door de hogere activiteitsconcentratie van in de bodem verwerkte materialen.
Elders in de wereld zijn gebieden waar de bodemstraling aanmerkelijk uitgaat boven het normale niveau (zelfs twee of drie orden van grootte). In Europa vindt men gebieden met verhoogde bodemstraling o.a. in Frankrijk, Italië en Duitsland. In Kerala (India) bestaat een langgerekt kustgebied waar een aanzienlijk aantal bewoners wordt blootgesteld aan dosisequivalenten van de orde van 0,01 Sv per jaar, als gevolg van een uitzonderlijk hoge thoriumconcentratie in de bodem. Een vergelijkbare situatie is onder meer aangetroffen in Brazilië.

Terrestrische straling in gebouwen
In houten gebouwen wordt de straling uit de bodem zodanig afgeschermd, dat het dosistempo binnenshuis ca. 70% van de buitenshuis gemeten waarde bedraagt (2). In stenen en betonnen gebouwen wordt de afschermende werking echter teniet gedaan door de radioactiviteit van de bouwmaterialen, waardoor het dosistempo binnenshuis gemiddeld ca. 30% hoger wordt dan buitenshuis. De kosmische straling is in beide genoemde gevallen buiten beschouwing gelaten. De invloed van de activiteit van bouwmaterialen wordt nader besproken op blz. 161

Inademing van primordiale nucliden
Als gevolg van inademing van radon en dochterprodukten bij de 'representatieve' concentratiewaarden vermeld in tabel III ontvangt de gemiddelde Nederlander een effectief dosisequivalent van ca. 7×10^{-4} Sv per jaar. Voor thoron en de dochterprodukten daarvan is de overeenkomstige waarde 4×10^{-4} Sv per jaar. De dosis op het longweefsel levert daarin verreweg de grootste bijdrage. Het overgrote deel van de dosis ontvangt men tijdens verblijf binnenshuis; aangenomen is dat 80% van de tijd binnen wordt doorgebracht (voor Nederland is dit in werkelijkheid wellicht meer dan 90%).

Opname via voedsel en water
Kalium-40 wordt tezamen met het niet-actieve kalium in het lichaam opgenomen, waardoor de gemiddelde concentratie in het lichaam ca. 60 Bq kg^{-1} bedraagt. Dit veroorzaakt een effectief dosisequivalent van $1,7 \times 10^{-4}$ Sv per jaar. Bij volwassenen zijn echter variaties tot ± 50% mogelijk. Het gedrag van rubidium in het milieu is niet goed bekend. De gemiddelde concentratie in het lichaam bedraagt ca. 8,5 Bq kg^{-1}, hetgeen een effectief dosisequivalent van 4×10^{-6} Sv per jaar oplevert.
Uranium en thorium komen vanuit de bodem in de voedselketen van de mens. Dagelijks neemt men via het voedsel 15 mBq uranium-238 en 40 mBq radium-226 op, in gebieden met een normaal uraniumgehalte in de bodem. Voor thorium-232 is deze hoeveelheid 4 mBq, maar dit nuclide wordt zeer slecht via het voedsel in het lichaam opgenomen. Van polonium-210 (een langlevend vervalprodukt van uranium-238) wordt in normale gevallen ca. 0,1 Bq per dag geconsumeerd, wat een effectief dosisequivalent van ca. 10^{-4} Sv per jaar veroorzaakt. Voor volkeren in de poolgebieden, die hoofdzakelijk leven van rendier- en kariboevlees waarin zich veel méér polonium-210 bevindt, wordt de dagelijkse 'portie' echter geschat op 4 Bq. Het gebruik van drinkwater met een radonconcentratie van 1.000 Bq per m^3 levert per jaar een effectief dosisequivalent op van 5×10^{-7} Sv als gevolg van inslikken en een tienmaal hogere waarde als gevolg van het inademen van dochterprodukten van het radon.

Fall-out
Tussen 1945 en heden hebben meer dan vierhonderd proefexplosies van kern-

wapens in de atmosfeer plaatsgevonden. Daarbij werden tal van radionucliden, met uiteenlopende halveringstijden, in niet onaanzienlijke hoeveelheden in de atmosfeer verspreid. Deze *fall-out* wordt via de ingewikkelde luchtstromen in de stratosfeer over grote afstanden getransporteerd en komt na verloop van tijd, voornamelijk tezamen met neerslag, geleidelijk op het aardoppervlak terecht. De tien nucliden die in tabel VI zijn vermeld zijn verantwoordelijk voor ca. 99% van het totale effectieve dosisequivalent ten gevolge van *fall-out*, berekend van het moment van ontstaan van de nucliden totdat ze geheel zijn vervallen.

Tabel VI. Effectieve dosisequivalent tengevolge van radionucliden in *fall-out* in de gematigde zone van het Noordelijk halfrond, en totale geproduceerde activiteit bij proefexplosies tot 1981.

Nuclide	Halveringstijd (jaren)	Effectief dosis-equivalent (10^{-5}Sv)	Totale geproduceerde activiteit (Bq)
koolstof-14	5.736	170	$2,2 \times 10^{17}$
caesium-137	30	91	$9,6 \times 10^{17}$
zirconium-95	0,18	28	$1,5 \times 10^{20}$
ruthenium-106	1	18	$1,3 \times 10^{19}$
cerium-144	0,78	15	3×10^{19}
strontium-90	28,5	14	6×10^{17}
barium-140	0,035	3,3	$7,4 \times 10^{20}$
plutonium-239	24.400	3,2	$7,4 \times 10^{15}$
ruthenium-103	0,11	2,6	$2,5 \times 10^{20}$
tritium	12,3	2,3	$1,8 \times 10^{20}$

De *fall-out* heeft voor de kosmogenische nucliden tritium en koolstof-14 in de troposfeer een aanmerkelijke activiteitsverhoging veroorzaakt (zie *Kosmogenische radionucliden,* blz. 155). Zo bedraagt bijvoorbeeld de tritiumconcentratie in de Nederlandse oppervlaktewateren, gemiddeld over 1979, 10.000 à 30.000 Bq m^{-3} (6). Na een maximum omstreeks 1963 is de *fall-out* echter gestaag gedaald. Het geschatte lichaamsdosisequivalent ten gevolge van caesium-137 is in Nederland van $1,2 \times 10^{-4}$ Sv in 1963 gedaald tot 7×10^{-6} in 1979; voor de beenmergdosis ten gevolge van strontium-90 luiden de cijfers respectievelijk 1,3 à $1,9 \times 10^{-4}$ Sv (1963) en 1 à $3,4 \times 10^{-5}$ Sv (1979).

Natuurlijke stralingsbronnen en technologische ontwikkeling

De blootstelling van de mens aan natuurlijke stralingsbronnen is onderhevig aan grote variaties, veroorzaakt door plaatselijke verschillen in de achtergrondstraling en in leefgewoonten. Daarnaast hebben bepaalde voortbrengselen van de technologische ontwikkeling een wijziging (veelal een verhoging) van de blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen tot gevolg. Op een aantal markante voorbeelden hiervan gaan wij nu iets dieper in.

Luchtvaart

Het dosisequivalenttempo van de kosmische straling neemt aanmerkelijk toe met de hoogte boven het zeeniveau (zie tabel VII), zodat vliegtuigbemanningen en passagiers die een belangrijk deel van de tijd in de lucht doorbrengen een extra hoeveelheid kosmische straling ontvangen. Gewone passagiersvliegtuigen vliegen op een maximale hoogte van 12 km, met een gemiddelde hoogte per vlucht van naar schatting 8 km. Supersonische toestellen zoals de Concorde bereiken echter hoogten van 20 km, met een geschat vluchtgemiddelde van 16 km. De kortere duur van

de vlucht geeft hier echter compensatie voor het hogere dosistempo. Voor een transatlantische vlucht bedraagt het gemiddelde effectieve dosisequivalent ca. 4×10^{-5} Sv.

Tabel VII. Dosisequivalenttempo van de galactische kosmische straling als functie van de hoogte boven het zeeniveau.

Hoogte (km)	Dosisequivalenttempo *) (μ Sv per uur)
4	0,20
8	1,35
12	4,93
16	9,70
20	12,75

*) Gemiddeld tussen 43° en 55° geografische breedte en tussen minimale en maximale zonne-activiteit.

Hoewel de solaire kosmische straling gemiddeld niet veel bijdraagt kan het dosisequivalenttempo op 20 km hoogte meerdere orden van grootte stijgen tijdens sterke zonnevlammen. De piloten van supersonische vliegtuigen hebben opdracht op lagere hoogte te gaan vliegen als de stralingsmeetinstrumenten aan boord een bepaald waarschuwingsniveau aangeven.

Bouwmaterialen met verhoogde radioactiviteit

De radioactiviteit van bepaalde bouwmaterialen kan in gebouwen leiden tot een verhoogd dosistempo alsmede tot een verhoging van de activiteitsconcentratie in de lucht. In dit verband zijn in de praktijk van belang de primordiale nucliden kalium-40, radium-226 met hun dochternucliden en thorium-232 met zijn dochternucliden. De activiteitsconcentraties van deze nucliden in een aantal bouwmaterialen zijn weergegeven in tabel VIII (gegevens uit diverse landen).

Tabel VIII. Representatieve waarden van activiteitsconcentraties van ^{40}K, ^{226}Ra en ^{232}Th in bouwmaterialen.*)

Materiaal	Gemiddelde activiteitsconcentratie (Bq kg^{-1})		
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
baksteen (klei)	700	70	70
kalkzandsteen	200	30	30
beton (divers)	700	60	50
puimsteen	1.100	130	130
graniet	1.200	100	80
Portland cement	240	20	15
zand en grind	240	20	20
natuurgips	40	15	10
fosforzuurgips	100	600	10
red mud steen	340	280	230
hoogovenslak	500	100	140
vliegas	700	200	130

*) Afhankelijk van herkomst grote variaties mogelijk.

De traditionele bouwmaterialen zijn globaal te karakteriseren met de volgende activiteitsconcentraties: kalium-40, 500 Bq kg^{-1}; radium-226 en thorium-232 beide 50 Bq kg^{-1} (9). Indien men deze waarden beschouwt als een referentieniveau, kan men berekenen wat de verhoging van het effectieve dosisequivalent ten gevolge van de terrestrische straling zal zijn in woningen met activiteitsconcentraties die een veelvoud zijn van dit referentieniveau (zie tabel IX). In flatwoningen is deze verhoging groter dan in eengezinswoningen, vanwege de grotere hoeveelheid omringend bouwmateriaal.

Tabel IX. Verhoging van het effectieve dosisequivalent door gammastraling ten gevolge van het verblijf in gebouwen met activiteitsconcentraties in het bouwmateriaal van 1, 2 of 4 × het referentieniveau.*)

	verhoging van het effectieve dosisequivalent (10^{-5} Sv/jaar)		
	1 × ref. niveau	2 × ref. niveau	4 × ref. niveau
eengezinswoning	3	30	80
flatwoning	10	50	120

*) Referentieniveau: bouwmateriaal met 500 Bq kg^{-1} ^{40}K, 50 Bq^{-1} ^{226}Ra en 50 Bq kg^{-1} ^{232}Th. Verhoging ten opzichte van het vrije veld; 80% verblijftijd in huis verondersteld.

Het wonen in stenen gebouwen brengt ook een verhoogde blootstelling aan radon en dochternucliden met zich mede. De gemiddelde concentratie hiervan in de ingeademde lucht hangt af van het exhalatietempo van radon uit wanden en vloer, en van de luchtverversing in het huis. Het exhalatietempo van radon wordt niet alleen bepaald door de activiteitsconcentraties van radium-226 en thorium-232 in het bouwmateriaal, maar ook door de mate van doorlaatbaarheid van het oppervlak. Als er scheuren in de vloer van de begane grond zijn, kan radonexhalatie uit de bodem een belangrijke bijdrage leveren. Uitgaande van een aantal veronderstellingen kan men de verhoging van het effectieve dosisequivalent ten gevolge van de inademing van radondochters berekenen, bij verblijf in woningen met activiteitsconcentraties in het bouwmateriaal die een veelvoud zijn van het referentieniveau (zie tabel X). In dit geval is de verhoging het grootst op de begane grond, door de radonexhalatie uit de vloer.

Tabel X. Verhoging van het effectieve dosisequivalent door inhalatie van radondochters ten gevolge van het verblijf in gebouwen met activiteitsconcentraties in het bouwmateriaal van 1, 2 of 4 × het referentieniveau.*)

	verhoging van het effectieve dosisequivalent (10^{-5} Sv/jaar)		
	1× ref. niveau	2× ref. niveau	4× ref.niveau
begane grond	75	150	300
hogere verdiepingen	40	75	150

*) Referentieniveau: bouwmateriaal met 50 Bq kg^{-1} ^{226}Ra. Verhoging ten opzichte van verblijf buitenshuis; 80% verblijftijd in huis verondersteld. Luchtverversingsfactor: 1× per uur.

De luchtverversingsfactor van gebouwen wordt zowel door bouwtechnische aspecten, weersomstandigheden, als door de leefgewoonten van de bewoners bepaald. In sterk geïsoleerde huizen kan de luchtverversingsfactor aanmerkelijk lager zijn dan

eenmaal per uur, waardoor de bewoners een niet onaanzienlijk dosisequivalent op het longweefsel kunnen ontvangen. Als doorsneewaarde voor de radonconcentratie binnenshuis wordt 2 Bq m^{-3} gevonden.

Verbranding van fossiele brandstoffen
Fossiele brandstoffen (kolen, olie, aardgas) bevatten een zekere hoeveelheid van de primordiale nucliden. De concentraties kunnen, afhankelijk van de herkomst van de brandstoffen, sterk uiteenlopen. Bij de verbranding van kolen wordt met de afvoergassen radon in de atmosfeer geloosd, alsmede een relatief grote hoeveelheid verbrandingsprodukten in de vorm van kleine deeltjes (vliegas). Vooral in de laatste jaren zijn veel studies verricht naar de concentraties van sporenelementen in kolen en in de as van kolengestookte energiecentrales (10). In tabel XI zijn representatieve waarden gegeven voor de activiteitsconcentraties van een aantal radioactieve nucliden in steenkool en vliegas, alsmede voor de geschatte in de atmosfeer geloosde activiteit per megawattjaar opgewekte elektrische energie. Bij dit laatste is uitgegaan van een deeltjesvormige lozing van 5% van de totale hoeveelheid as en verbranding van 3.000 ton kolen per megawattjaar elektrische energie. Sommige nucliden vindt men in de vliegas in hogere concentratie terug dan in de slakken en sintels.

Tabel XI. Activiteitsconcentraties van primordiale radionucliden in steenkool en in ontsnappende vliegas uit kolengestookte elektriciteitscentrales. In de atmosfeer geloosde activiteit per megawattjaar opgewekte elektrische energie.*)

Activiteitsconcentratie (Bq kg^{-1}) resp. activiteit (Bq per MW (e)-jaar)

	^{40}K	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb, ^{210}Po	^{232}Th	^{222}Rn
Activiteitsconcentratie in steenkool	50	20	20	20	20	20
in ontsnappende vliegas	400	150	150	500	150	-
Activiteitslozing in atmosfeer per MW-jaar elektrische energie	8.10^{6}	3.10^{6}	3.10^{6}	10^{7}	3.10^{6}	6.10^{7}

*) 5% van de totale ashoeveelheid in de atmosfeer geloosd. Verbranding van 3.000 ton kolen per MW(e)-jaar.

Inademing van de geloosde activiteit, opname van activiteit via voedingsmiddelen en uitwendige bestraling door op de bodem neergeslagen activiteit dragen alle bij tot de berekende stralingsdosis van de omwonenden, die naar schatting 0,008 man-Sv per MW(e)-jaar opgewekte energie bedraagt.
Het aardgas in Nederland bevat radon met een concentratie van de orde van 100 Bq m^{-3}(11). Bij een jaarverbruik van ca. 5×10^{10} m^3 aardgas is de lozing in de atmosfeer 5×10^{12} Bq. Huishoudelijk gebruik van aardgas (bijvoorbeeld koken, 1 m^3 per dag) geeft in keukens met beperkte afmetingen en geringe ventilatie tijdelijk een verhoging van de 'normale' radonconcentratie.

Diverse toepassingen van ioniserende straling

Men kan zich afvragen in hoeverre stralingsdoses, veroorzaakt door toepassingen van ioniserende straling, nog mogen worden gerekend tot de achtergrondstraling die vaak als referentieniveau wordt gehanteerd bij de beoordeling van het risico van andere toepassingen.

Anderzijds moet worden vastgesteld, dat een aantal toepassingen is ingeburgerd in ons dagelijks leven en daaruit niet meer is weg te denken. Voorbeelden hiervan zijn het medisch gebruik van straling, lichtgevende gebruiksvoorwerpen, antistatische apparaten, rookmelders en televisietoestellen. De individuele stralingsdoses als gevolg van deze toepassingen zullen uiteraard sterk uiteenlopen. Daar de toepassingen al op ruime schaal plaatsvinden is het echter zinnig om een gemiddelde dosis per hoofd van de bevolking uit te rekenen.

Medisch gebruik van straling

Na de natuurlijke achtergrondstraling leveren medische toepassingen van straling de grootste bijdrage tot de gemiddelde stralingsdosis in de ontwikkelde landen. Men maakt onderscheid tussen de doses veroorzaakt door respectievelijk de röntgendiagnostiek, de nucleaire geneeskunde en de stralingstherapie. Bij de therapeutische bestralingen worden verreweg de hoogste individuele doses ontvangen, maar het aantal is betrekkelijk gering.

Het aantal röntgendiagnostische verrichtingen in geïndustrialiseerde landen bedraagt echter 400 tot 1.600 per 1.000 inwoners per jaar, waardoor deze toepassing voor de bevolking als geheel het belangrijkst is. De nucleaire geneeskunde (diagnostiek met behulp van toegediende radionucliden) is nog in opkomst: naar schatting 15 tot 30 onderzoeken per 1.000 inwoners per jaar in ontwikkelde landen. Bij de röntgendiagnostiek zijn de doses op de voor straling meest gevoelige organen (geslachtsklieren, rode beenmerg, longen, borsten) sterk afhankelijk van het type onderzoek; bij een bepaald type onderzoek kunnen technische parameters (bijvoorbeeld filtratie en diafragmering van de stralenbundel, afscherming van het scrotum bij mannelijke patiënten, toepassing van moderne beeldregistratietechnieken) nog tot zeer grote onderlinge dosisverschillen leiden.

In Nederland wordt het genetisch significante dosisequivalent (het gemiddelde dosisequivalent op de geslachtsklieren, gewogen naar het verwachte aantal kinderen) geschat op $1{,}5 \times 10^{-4}$ Sv per jaar. Het gemiddelde effectieve dosisequivalent per hoofd van de bevolking in ontwikkelde landen wordt geschat op 0,5 tot 2×10^{-3} Sv per jaar, inclusief een bijdrage van de radiotherapie van ca. 30%.

Lichtgevende gebruiksvoorwerpen

Lichtgevende verf die een radioactieve stof bevat vindt wijdverbreide toepassing in wijzerplaten van uurwerken en andere instrumenten. De meest gebruikte radionucliden zijn radium-226, promethium-147 en tritium. Radium-226 raakt steeds meer in onbruik vanwege de uitgezonden gammastraling (de twee andere nucliden zenden alleen bètastraling uit); in Nederland mag in polshorloges niet meer radium-226 worden verwerkt dan 3,7 kBq. De dosis op de geslachtsklieren door het dragen van een radium-226-houdend polshorloge bedraagt $1{,}6 \times 10^{-8}$ Sv Bq^{-1}. Om dezelfde helderheid te krijgen als met radium-226 zijn voor promethium-147 en tritium veel grotere activiteiten nodig. Tritium diffundeert langzaam uit het horloge en wordt via de huid gedeeltelijk in het lichaam opgenomen; de geschatte dosis bedraagt 8×10^{-15} Sv Bq^{-1} per jaar (toegestaan in Nederland $1{,}85 \times 10^{8}$ Bq).

Een vrij nieuwe ontwikkeling zijn *bèta-lights:* met tritiumgas gevulde glazen buisjes waarvan de binnenkant is bekleed met fosforescerend materiaal. Deze buisjes kunnen in allerlei vormen en afmetingen worden toegepast; in Nederland is dit echter niet wettelijk toegestaan.

Diverse apparaten en gebruiksgoederen

Rookmelders waarin gebruik wordt gemaakt van de alfastraling, uitgezonden door een radioactief nuclide, vinden op ruime schaal toepassing. Tegenwoordig bevatten de meeste radioactieve rookmelders americium-241 (gemiddeld 10^{11} Bq). Het

americium-241 zendt geen doordringende gammastraling uit en is goed gefixeerd, zodat personen in de omgeving geen noemenswaardige stralingsdosis ontvangen.
In kleurentelevisietoestellen wordt door de hoge versnellingsspanning in de beeldbuis röntgenstraling opgewekt. Moderne toestellen voldoen in het algemeen aan het voorschrift, dat het exposietempo op 5 cm van het scherm niet hoger mag zijn dan 0,5 milliröntgen per uur; in de meeste gevallen is het exposietempo veel lager.

Samenvatting

In tabel XII zijn representatieve waarden samengevat voor het effectieve dosisequivalent, dat de 'gemiddelde' Nederlander jaarlijks ontvangt uit natuurlijke en kunstmatige bronnen van achtergrondstraling.

Tabel XII. Gemiddeld effectief dosisequivalent in Nederland uit natuurlijke en kunstmatige stralingsbronnen.

Bron	Gemiddeld effectief dosisequivalent (Sv per jaar)		
	uitwendige bestraling	inwendige bestraling	Totaal
Natuurlijke bronnen			
Kosmische straling	$3 . 10^{-4}$	-	$3 . 10^{-4}$
Kosmogenische radionucliden	-	$8 . 10^{-6}$	$8 . 10^{-6}$
Primordiale nucliden:			
^{40}K	$1{,}2 . 10^{-4}$	$1{,}7 . 10^{-4}$	$2{,}9 . 10^{-4}$
^{87}Rb	-	$4 . 10^{-6}$	$4 . 10^{-6}$
^{238}U + dochters	$8. 10^{-5}$	$7 . 10^{-4}$	$8 . 10^{-4}$
^{232}Th + dochters	$1{,}2 . 10^{-4}$	$4 . 10^{-4}$	$5 . 10^{-4}$
Totaal (afgerond)	$6{,}2 . 10^{-4}$	$1{,}3 . 10^{-3}$	$1{,}9 . 10^{-3}$
Kunstmatige bronnen			
fall-out		$\sim 3 . 10^{-5}$	$\sim 3 . 10^{-5}$
medische stralingstoepassingen	$\sim 5 . 10^{-4}$		$\sim 5 . 10^{-4}$

Referenties

(1) O.C. Allkofer, *Introduction to Cosmic Radiation,* Verlag Karl Thiemig, München 1975.

(2) *Ionizing Radiation: Levels and Effects,* Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations, New York 1972.
Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations, New York 1977.

(3) *Natural Background Radiation in the United States,* NCRP-Report No. 45, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington DC 1975.

(4) *Environmental Radiation Measurements,* NCRP-Report No. 50, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington DC 1976.

(5) M. Eisenbud, *Environmental Radioactivity,* Academic Press, New York 1973.

(6) *Algemene Radioactieve Besmetting van de Biosfeer in Nederland - verrichte metingen 1979.* Verslagen, Adviezen en Rapporten nr. 65, Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1980.

(7) Metingen Radioactiviteit van het Gemeentelijk Waterleidingbedrijf te Rotterdam.

(8) R. van Dongen en L. Strackee, *Metingen van de Natuurlijke Achtergrondstraling met Behulp van een Scintillatieplasticdetector.* Rapport nr. 171/74 Stro, Rijksinstituut voor de Volksgezondheid, Bilthoven 1974.

(9) *Exposure to Radiation from the Natural Radioactivity in Building Materials,* Report by a Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Cooperation and Development, Parijs 1979.

(10) H.A. van der Sloot, J. Zonderhuis en C.A. van Stigt, Spoorelementen in Steenkool en Steenkoolas. *Energiespectrum,* juni 1981.

(11) H.B. van der Heide, H. Beens en A.R. de Monchy, The Occurrence of Radioactive Elements in Natural Gas, *Ecotoxicology and Environmental Safety 1* (1977), blz. 49-87.

13. GENETISCHE EFFECTEN VAN IONISERENDE STRALING

F.H. Sobels

Biologische effecten van ioniserende straling zijn alle terug te voeren op een verandering in de normale processen in lichaamscellen. Onderscheid dient te worden gemaakt tussen effecten die zich openbaren bij bestraalde individuen en die bij hun eventuele nakomelingen. Het gaat hier om veranderingen van een heel apart karakter en daarom worden deze somatische en genetische effecten in afzonderlijke hoofdstukken besproken – de laatstgenoemde voorop, omdat ze wellicht de meeste aandacht trekken. Erfelijkheid is de continuïteit van een verschijningsvorm van leven in opeenvolgende generaties. Deze continuïteit ligt besloten in bepaalde structuren in de kernen der geslachtscellen. Het gehele overerfbare materiaal, de genetische informatie, is opgeslagen in de draadvormige lichaampjes der chromosomen, die de vele tienduizenden erfelijke elementen (de genen) bevatten. Dit hoofdstuk gaat over de invloed van ioniserende straling op de bijzondere eigenschap van chromosomen, dat ze een nauwkeurige kopie van zichzelf kunnen vormen. Kleine onnauwkeurigheden, die men mutaties noemt, zijn echter mogelijk en zij kunnen iedere levensfunctie betreffen. Straling verhoogt de mutatie-snelheid. Een systeem van enzymen, opgebouwd in het evolutieproces in de aanwezigheid van natuurlijke ioniserende straling, zorgt echter voor een herstel. Ingegaan wordt op de effecten die thans voorspeld kunnen worden voor een verhoging van het stralingsniveau boven dat van de natuurlijke achtergrond.

Blootstelling aan ioniserende straling kan een verscheidenheid van biologische effecten ten gevolge hebben. In dit hoofdstuk zullen wij de zogenaamde genetische of overerfbare effecten van straling bespreken. Deze effecten komen niet bij het bestraalde individu zelf tot uitdrukking, maar bij diens nakomelingen of pas in latere generaties. Voor een goed begrip hiervan is een korte inleiding over het genetisch materiaal en enkele principes van de overerving wel gewenst.

Biologisch systeem voor de overerving

De meest eenvoudige voorstelling van erfelijkheid is dat kinderen een bepaalde gelijkenis met hun ouders vertonen. Hieraan ligt de gedachte ten grondslag dat een bepaald materiaal, verantwoordelijk voor de familietrekken, van de ene generatie op de volgende wordt overgedragen. Dit genetisch materiaal bestaat uit vele verschillende elementen (bij de mens zijn het er wel 30.000), die genen genoemd worden. De genen zijn samengevoegd in langwerpige lichaampjes, de chromosomen. De chromosomen komen voor in alle celkernen en kunnen tijdens de kerndeling zichtbaar gemaakt worden met bepaalde kleurstoffen; hieraan ontlenen ze hun naam. In de lichaamscellen van de mens treft men 46 chromosomen aan; 23 chromosomen zijn afkomstig van de vader en 23 van de moeder. Ieder chromosoom is dus paarsgewijs vertegenwoordigd. Bij de vorming van de geslachtscellen wordt het aantal chromosomen tot de helft teruggebracht. Dit gebeurt tijdens de reductiedeling of meiose, waarbij het aantal van 46 chromosomen tot 23 gehalveerd wordt. Deze halvering is noodzakelijk omdat bij het eigenlijke bevruchtingsproces, de

versmelting van de celkern van de spermazoïden met die van de eicel, het aantal van 46 teruggevormd wordt. De mannelijke en vrouwelijke geslachtscellen dragen dus in gelijke mate bij tot de genetische constitutie van de bevruchte eicel, waaruit de nieuwe mens ontstaat. Hierbij zal duidelijk geworden zijn, dat in feite de celkernen binnen de geslachtscellen de opeenvolgende generaties onderling verbinden. Binnen deze kernen liggen de genen, uiterst gecomprimeerd verpakt in de chromosomen, die de genetische informatie bevatten welke in samenhang met het milieu bepalend is voor de ontwikkeling van het nieuwe individu. Hoe efficiënt deze verpakking is wordt duidelijk uit een berekening van de bekende geneticus H.J. Muller, waaruit blijkt dat het genetisch materiaal van de gehele thans levende mensheid van ongeveer vier miljard individuen niet meer ruimte inneemt dan vijf à zes aspirinetabletjes. Genen bepalen onze bloedgroepen, de kleur van haar, ogen en huid en vormen de basis van onze intelligentie of muzikaliteit. Ook zijn er genen die de ontwikkeling van bepaalde orgaansystemen op abnormale wijze beïnvloeden, en zo tot overerfbare ziekten en afwijkingen aanleidingen kunnen geven.

In de bevruchte eicel en in de cellen die daaruit gevormd worden, komen de chromosomen paarsgewijs voor. Zo hoort ook bij ieder gen van de vader een overeenkomstig gen van de moeder. Soms zijn deze genen van een paar aan elkaar gelijk, maar voor vele genenparen is dit niet het geval. Dan is als regel de relatie tussen de twee bij elkaar behorende genen van een paar zodanig, dat het ene gen het andere onderdrukt. Het gen met overheersende werking wordt dominant genoemd, het gen dat onderdrukt wordt, recessief. Dominant overervende genen komen reeds tot uitdrukking als zij van één der beide ouders ontvangen worden. Zo zal het gen voor bruine oogkleur het gen voor blauwe oogkleur onderdrukken in individuen die van één der beide ouders het gen voor bruine oogkleur en van de andere ouder het gen voor blauwe oogkleur hebben ontvangen. Kinderen die van beide ouders het recessieve gen voor blauwe oogkleur ontvangen hebben, kunnen daarentegen blauw iris-pigment ontwikkelen.

Mutatie

Chromosomen en genen hebben een bijzondere eigenschap die hen onderscheidt van andere levende materie, namelijk het vermogen tot zelfreproduktie. Tijdens de celdeling wordt namelijk van ieder chromosoom en de daarin gelegen genen een exacte kopie gevormd. De nauwkeurigheid van dit kopiëringsproces is zeer groot; maar zelden (ongeveer een- of tweemaal per 100.000 cellen) komen veranderingen in een gen voor, die mutaties worden genoemd. Nadat de mutatie is opgetreden wordt het gen niet meer in zijn oorspronkelijke, maar in de nieuwe, gemuteerde vorm aan de dochtercellen doorgegeven. Wanneer mutatie plaatsvindt in geslachtscellen of in de cellen waaruit deze worden gevormd, bestaat er een kans dat een mutatie aan de nakomelingen wordt doorgegeven.
Op moleculair niveau kan men zich mutaties voorstellen als veranderingen in de bouwstenen van het desoxyribonucleïnezuur, DNA. Dit is de substantie waaruit het genetisch materiaal bestaat. Het is de samenstelling van het DNA die verantwoordelijk is voor de erfelijke eigenschappen. Het DNA-molecuul is opgebouwd uit twee lange, om elkaar gestrengelde suiker-fosfaatketens, die onderling verbonden worden door baseparen, adenine-thymine en guanine-cytosine. Een DNA-molecuul doet aan een wenteltrap denken, waarbij de stijlen door het suiker-fosfaatskelet en de treden door aan elkaar gekoppelde basen gevormd worden. Deze vier eenvoudige organische basen, adenine (*A*), thymine (*T*), guanine (*G*) en cytosine (*C*) vormen de letters van het genetische alfabet, de genetische informatie die verantwoordelijk is voor de samenstelling van de lichaamseiwitten. Eiwitten bestaan uit ami-

nozuren en ieder aminozuur wordt door een combinatie van drie basen bepaald, de zogenaamde tripletten. Zo vormt het triplet *TTT* de code voor het aminozuur phenylalanine, *TCG* die voor serine en *TTG* die voor leucine. Bij mutatie worden bepaalde basen door andere vervangen. Als bijvoorbeeld in het tweede triplet *TCG* de tweede base cytosine (*C*) door thymine (*T*) vervangen wordt, zal het gemuteerde gen *TTT-TTG-TTG* nu tot de vorming van phenylalanine-leucine-leucine aanleiding geven. Ook kunnen bij mutatie bepaalde basen uitvallen of tussen geschoven worden, met als gevolg een ernstige verstoring van de triplet-code. Dankzij vernuftige onderzoekingen met micro-organismen, die tot bovengenoemd inzicht hebben geleid, kunnen we ons nu een duidelijke voorstelling van mutatie op moleculair niveau maken.

Mutatie wordt echter in eerste instantie niet op dit niveau waargenomen, maar pas als bij een bepaalde nakomeling een nieuw en niet meer het oorspronkelijke kenmerk tot uitdrukking komt. Met mutaties die als bepaalde rassen of variëteiten verder worden gekweekt, zijn wij allen vertrouwd. Iedereen kent mutaties die verantwoordelijk zijn voor de kleur- en vormverschillen van bloemen als leeuwenbekjes, petunia's en tulpen of de albino-mutatie bij muizen, konijnen of de mens. Mutaties kunnen in feite iedere willekeurige levensfunctie veranderen, of deze nu de stofwisseling, de vruchtbaarheid, het gehoor- of gezichtsvermogen of de geestelijke eigenschappen van de mens betreffen.

Straling kan mutaties in iedere willekeurige lichaamscel veroorzaken, maar alleen mutaties die in geslachtscellen voorkomen maken een kans op de nakomelingen te worden overgedragen. Het tot uitdrukking komen van mutaties hangt af van de wijze van overerving. Zo zal een dominante mutatie die door straling in de geslachtscellen van één van de ouders is geïnduceerd, zich bij een directe nakomeling van het bestraalde individu kunnen manifesteren. Dit is anders voor recessieve mutaties, die niet of nauwelijks tot uiting komen als er een normaal partnergen tegenover staat, dat de werking van het recessieve gen onderdrukt. Behalve bij bloedverwanten die dezelfde genen van gemeenschappelijke voorouders kunnen ontvangen, is de kans op manifestatie van recessieve mutaties uiterst gering. Dominant en recessief zijn echter geen absolute begrippen, omdat de meeste recessieve genen, als zij van één der beide ouders ontvangen zijn, toch wel enig effect hebben. Met deze partiële dominantie houden wij later rekening bij onze risicoschattingen.

Door straling wordt de frequentie verhoogd, waarmee genetische veranderingen van nature optreden. Verreweg de meeste geïnduceerde genetische veranderingen hebben een ongunstig effect. Dit is niet verwonderlijk als men bedenkt dat de mutatie, hetzij spontaan of door straling geïnduceerd, een toevalsmatige verandering betekent in een systeem dat gedurende miljoenen jaren geselecteerd is voor het optimaal functioneren van uiterst nauwkeurige, op elkaar afgestemde biochemische reacties en fysiologische processen.

Gedurende de laatste twintig jaar is steeds meer bekend geworden over biologische processen in de cel die aan het DNA toegebrachte schade kunnen herstellen. Men dient te bedenken dat levende organismen, sinds hun ontstaan op aarde, aan natuurlijke straling zijn blootgesteld. Daarom werden in het evolutieproces enzymsystemen ontwikkeld die verantwoordelijk zijn voor het herstel van beschadigd DNA. Als echter in korte tijd veel beschadigingen van het DNA ontstaan, zoals het geval is bij blootstelling aan kunstmatige stralingsbronnen, wordt de kans groter dat de aanwezige DNA-herstelprocessen het 'herstelwerk' niet meer aankunnen, of dat er 'fouten' worden gemaakt. Zulke fouten geven, tezamen met niet herstelde DNA-beschadigingen, aanleiding tot het ontstaan van mutaties in de genen. Dan zal een fout eiwit worden geconstrueerd, dat zijn functies anders zal uitoefenen dan het niet gemuteerde eiwit.

Een meer filosofisch ingestelde lezer zal zich op dit punt misschien afvragen waarom dit merkwaardige mutatieproces, dat ogenschijnlijk alleen maar nadelen

voor levende systemen lijkt op te leveren, eigenlijk in de natuur is ontstaan. Hierbij moet men bedenken dat door mutatie de bron van genetische variabiliteit wordt aangevuld, die de populatie de flexibiliteit verleent om zich ook onder veranderde omstandigheden opnieuw aan te kunnen passen. In het mutatieproces heeft de natuur de mogelijkheid gegeven om de verstarring van de genetische constitutie te voorkomen. De effecten van mutaties kan men niet absoluut beoordelen, maar uitsluitend in samenhang met de eisen die een bepaald milieu aan het organisme stelt. Een mutatie tot albinisme bij knaagdieren bijvoorbeeld is in eerste instantie ongunstig, omdat het witte dier een gemakkelijker prooi voor roofdieren wordt dan de grauwe konijnen of muizen. Maar bij verandering van de klimaatsomstandigheden, of bij migratie van de soort naar polaire of hoog-alpine gebieden, zal de mutatie tot albinisme de desbetreffende soort de mogelijkheid geven zich bij het nieuwe leefmilieu aan te passen.

Chromosoomafwijkingen

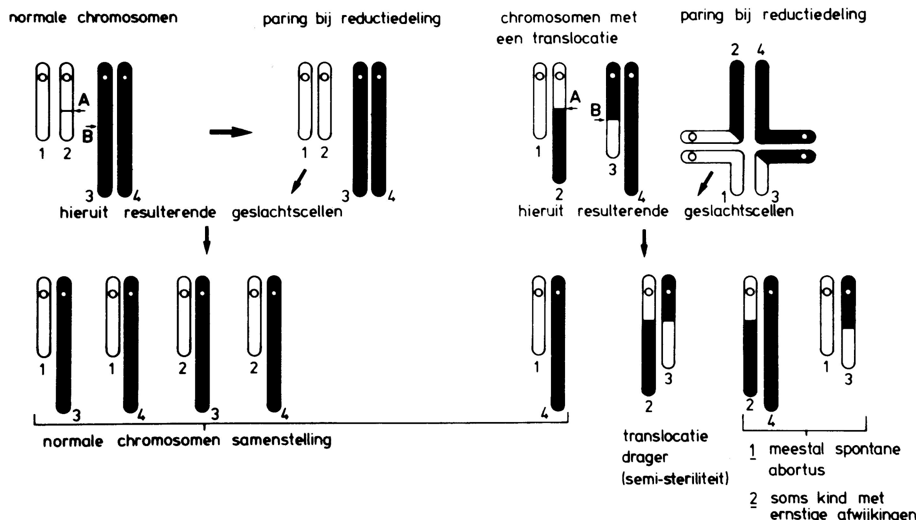
Bij een beschouwing van de genetische veranderingen die onder invloed van straling kunnen optreden, hebben wij ons tot nu toe beperkt tot mutaties, de microscopisch niet waarneembare veranderingen van de individuele genen op het niveau van de nucleotide basen in het DNA-molecuul. Daarnaast kan straling tot verschillende soorten chromosoomafwijkingen aanleiding geven. Deze worden onderscheiden in structurele en numerieke chromosoomafwijkingen.

normaal chromosoom	fragment	normale chromosomen	dicentrisch chromosoom plus fragment	reciproke translocatie

Figuur 1
Verschillende soorten door straling geïnduceerde chromosoom-afwijkingen (zie tekst). Vrij naar (1).

Structurele chromosoomafwijkingen

Van de structurele afwijkingen zijn de reciproke translocaties het meest bekend. Translocaties ontstaan doordat, onder invloed van straling of andere oorzaken, twee verschillende chromosomen gebroken worden en de daardoor ontstane fragmenten verwisseld worden en dan met elkaar versmelten. Wanneer een chromosoom gebroken wordt, ontstaan twee fragmenten, een gedeelte met een centromeer en een gedeelte zonder centromeer; het centromeer is de structuur waarmee het chromosoom tijdens de celdeling getransporteerd wordt. Bij breuken in twee chromosomen ontstaan derhalve twee acentrische (zonder centromeer) en twee centrische fragmenten (de gedeelten met centromeer) (zie figuur 1). De reciproke, levensvatbare translocatie, waarvan in deze samenhang sprake is, ontstaat als het centrische fragment van het ene chromosoom versmelt met het acentrische fragment van het andere en vice versa (figuur 1). Het ontstaan van translocaties in geslachtscellen kan worden aangetoond met behulp van genetische en cytologische technieken. De cytologische techniek wordt het meest toegepast, o.a. voor de bestudering van translocaties die in spermatogonia van muizen, apen en mensen geïnduceerd zijn. Bevruchting van een eicel zonder translocatie door een spermatozoïde met een translocatie leidt in de meeste gevallen tot een normaal individu. De problemen ontstaan bij de nakomelingen van een dergelijke 'translocatie-



Figuur 2
Links: de normale situatie; rechts: een individu dat een translocatie van een van zijn ouders heeft geërfd zal vier verschillende soorten geslachtscellen produceren, en wel van links naar rechts *1* met normale chromosomen; *2* met de gebalanceerde translocatie waaruit kinderen gevormd worden die als regel normaal zijn; *3* en *4* met ongebalanceerde stellen chromosomen die gekenmerkt zijn door duplicaties en deficiënties voor de bij de translocatie betrokken chromosoomfragmenten en die daardoor tot abortus of tot abnormale kinderen aanleiding kunnen geven.

drager'. Deze maakt vier typen geslachtscellen in gelijke proporties (figuur 2). Een kwart van de nakomelingen resulteert uit geslachtscellen met ongetransloceerde, normale chromosomen. Een ander kwart van de cellen draagt de translocatie, en bij de bevruchting resulteert die in translocatie-dragers. De overige helft van de geslachtscellen heeft te veel materiaal van het ene chromosoom en te weinig van het andere. Dit zijn de zogenaamde ongebalanceerde translocaties. Bij ± 94% van de vruchten leiden deze ongebalanceerde translocaties tot sterfte vóór de geboorte, maar ± 6% van de vruchten ontwikkelt zich tot nakomelingen met ernstige geestelijke en/of lichamelijke gebreken. In de geboorte van deze afwijkende kinderen schuilt het grootste gevaar van de translocatie-inductie.
Volledigheidshalve zij hierbij vermeld dat bij de vorming van de translocaties ook de twee centrische fragmenten met elkaar en de twee acentrische fragmenten kunnen versmelten (zie figuur 1). Versmelting van de twee centrische fragmenten geeft aanleiding tot een dicentrisch chromosoom (een chromosoom met twee centromeren), dat bij de celdeling uit elkaar wordt getrokken en daardoor verdere deling onmogelijk maakt. In geslachtscellen zullen deze dicentrische chromosomen tot zeer vroeg optredende abortus aanleiding geven en zij vormen daarom geen genetisch risico. In lichaamscellen zijn deze dicentrische chromosomen microscopisch aantoonbaar. De frequentie waarmee ze optreden in witte bloedcellen wordt als maatstaf gebruikt voor de door het individu ontvangen stralingsdosis. Dit is in feite een van de gemakkelijkst aantoonbare, maar uiteraard niet overerfbare veranderingen die door straling in het genetisch materiaal wordt teweeggebracht.

Numerieke chromosoomafwijkingen

Bij iedere celdeling van de geslachtscellen worden de chromosomen op regelmatige wijze over de dochtercellen verdeeld. Wanneer bij dit proces een verstoring optreedt, worden dochtercellen gevormd die een chromosoom te veel of te weinig bezitten. Dit verschijnsel, de zogenaamde nondisjunctie, komt van nature met

hoge frequentie bij de mens voor. Minstens 50% van alle gevallen van spontane abortus wordt gekenmerkt door afwijkingen van het normale aantal van 46 chromosomen. Mongoloïde idiotie of Down's syndroom is een bekend voorbeeld van een levensvatbare chromosoomafwijking; bij dergelijke patiënten is één der kleine chromosomen in drievoud (in plaats van het normale tweevoud) aanwezig en dit leidt tot ernstige ontwikkelingsstoornissen.
De inductie van deze numerieke chromosoomafwijkingen na bestraling is echter niet op overtuigende wijze bij zoogdieren en de mens aangetoond en daarom zal hierop niet nader worden ingegaan bij de risicoschattingen.

Gegevens voor de schatting van genetische stralingsschade

Het biologisch materiaal
Bij de mens zelf staan te weinig gegevens ter beschikking om daarop een risicoschatting te kunnen baseren. Sinds meer dan vijftig jaar is bekend dat bestraling overerfbare veranderingen in het genetisch materiaal van bijvoorbeeld het bananevliegje en gerst kan veroorzaken. Voor risicoschattingen maken wij echter bij voorkeur gebruik van gegevens die in experimenten met zoogdieren zijn verkregen. Voor mutaties zijn dit gegevens bij muizen; voor translocaties gebruiken we waarnemingen bij bestraalde vrijwilligers en apen, aangevuld met gegevens die onder verschillende stralingscondities bij de muis zijn verzameld. Voor de toegepaste detectiemethoden zie (1).

Ontwikkelingsstadia van de geslachtscellen
In het voorgaande hebben wij gezien, dat alleen mutaties en chromosoomafwijkingen die in de geslachtscellen geïnduceerd worden, kans maken op de nakomelingen te worden overgedragen.
De rijpe spermacellen ontwikkelen zich uit de spermatogonia; hiervoor zijn ongeveer 73 dagen nodig. Deze periode bedraagt slechts 0,7% van de duur van een generatie bij de mens, terwijl de spermatogoniale cellen steeds in de testes aanwezig zijn en nieuwe spermacellen kunnen vormen. De verblijfsduur van deze cellen in de testes omvat meer dan 99% van de totale levensduur. Voor de beoordeling van genetische bestralingsrisico's wordt derhalve speciaal met de mutatie-inductie in deze goniale cellen rekening gehouden.
Bij de geboorte van een meisje is dit anders; dan is de ontwikkeling van haar eicellen al grotendeels voltooid en blijven de eicellen tot aan de eerste ovulatie (menstruatie) in een rustfase.
De verschillende stadia van de geslachtscellen hebben een verschillende gevoeligheid voor de inductie van genetische veranderingen door bestraling. Zo worden mutaties met aanzienlijk hogere frequenties in de latere stadia van de spermaontwikkeling (rijp sperma en spermatiden) geïnduceerd, dan in de spermatogonia. Na blootstelling aan een belangrijke dosis straling kan genetische schade op eenvoudige wijze worden vermeden door bevruchting gedurende zes tot acht weken te voorkomen.

Bestralingscondities
De bestralingscondities waarmee bij toepassing van kernenergie bovenal rekening moet worden gehouden, betreffen kleine doses straling bij chronische exposie over langere tijd gespreid. De totale jaarlijke gonadendosis (dit is de dosis op de geslachtscellen) van kernenergiecentrales met een totaal vermogen van 3.500 MW(e) bedraagt 0,015 mrem per jaar per hoofd van de bevolking. Ter vergelijking zij hierbij vermeld dat de dosis natuurlijke achtergrondstraling (kosmische stra-

ling, straling afkomstig uit de bodem en bouwmaterialen van huizen, natuurlijke radioactiviteit in het lichaam) ongeveer 100 mrem bedraagt en die van medische toepassingen van straling ongeveer 55 mrem.

De dosis-effect-relatie en de accumulatie van mutaties

Van bijzondere betekenis is het verband tussen stralingsdosis en mutatiefrequentie. Bij spermatogonia van de muis werd gevonden dat het aantal geïnduceerde puntmutaties recht evenredig toeneemt met de toegediende dosis straling. Voor deze cellen werden dus geen aanwijzingen gevonden voor een drempelwaarde of veilige dosis die kan worden toegepast zonder gevaar voor mutatie-inductie. In jonge eicellen van de muis werd inductie van mutaties niet overtuigend aangetoond; derhalve zijn uitspraken over de dosis-effect-relatie voor dit stadium niet mogelijk. Uitgaande van de gevonden lineaire dosis-effect-relatie kan worden gesteld dat blootstelling van veel personen aan een kleine dosis straling evenveel mutaties veroorzaakt als een hoge dosis bij weinig personen, mits bij beide groepen de totale door de geslachtscellen ontvangen dosis en de kans op nakomelingschap even groot is. Dus indien bij een bevolking van tien miljoen personen elk individu binnen de reproduktieve periode een dosis van 0,1 rad ontvangt, dan worden er in deze bevolking evenveel mutaties geïnduceerd als in een even grote populatie waarbij honderdduizend personen elk 10 rad ontvangen. Een dosis-effect-relatie voor de inductie van reciproke translocaties in spermatogonia is vooral bestudeerd bij de muis, maar er zijn ook gegevens beschikbaar voor andere zoogdieren, waaronder twee soorten apen en de mens. In het lage dosisgebied dat voor de risico-evaluatie het meest interessant is, is de dosis-effect-relatie lineair. Over de inductie van translocaties in jonge eicellen bestaan onvoldoende gegevens.
Op grond van experimentele gegevens wordt aangenomen, dat als een mutatie is geïnduceerd, geen herstel van deze verandering of eliminatie van de cel met de mutatie plaats vindt. Voor de schatting van de genetische risico's wordt derhalve rekening gehouden met de totale geaccumuleerde hoeveelheid straling die vanaf de conceptie tot het einde van de reproduktieve leeftijd ontvangen wordt.

Risicoschattingen

Aan de schatting van genetische risico's liggen een aantal veronderstellingen en uitgangspunten ten grondslag die ten dele in het voorgaande werden besproken, maar volledigheidshalve nogmaals puntsgewijs zullen worden samengevat.

1. De schatting heeft betrekking op de zogenaamde stamcelspermatogonia bij de man en rustende eicellen bij de vrouw. Het zijn immers deze stadia die gedurende de gehele reproduktieve periode aan de straling zijn blootgesteld en waarin men rekening moet houden met de totale hoeveelheid geaccumuleerde straling die vanaf de conceptie tot het einde van de reproduktieve leeftijd wordt ontvangen.
2. De dosis-effect-relatie is lineair en er bestaat althans voor spermatogonia geen drempeldosis.
3. De schattingen hebben betrekking op straling met een lage ionisatiedichtheid (LET), omdat deze verreweg het meest praktische toepassing vindt.
4. De bestralingsomstandigheden betreffen chronische blootstelling over jaren, zoals bij radiologische werkzaamheden en kernenergieproduktie, of kleine doses, zoals bij röntgendiagnostiek.
5. Tenslotte wordt aangenomen dat wat betreft de mutatie-inductie de stralingsgevoeligheid van de mens hetzelfde is als die bij muizen. Alleen voor translocaties staan ook gegevens voor apen en de mens zelf ter beschikking. Voor de rhesusaap lijkt de inductie van translocaties aanzienlijk geringer te zijn dan bij de marmoset (2).

Uitgaande van deze veronderstellingen kunnen twee verschillende methoden wor-

den toegepast om de genetische risico's te schatten. Ten eerste de zogenaamde 'directe' methode, waarbij de genetische stralenschade wordt uitgedrukt in het aantal geïnduceerde mutaties en translocaties. Een bezwaar dat hiertegen soms naar voren wordt gebracht is dat het moeilijk blijft deze genetische schade in tastbaar menselijk leed uit te drukken. Hieraan komt de tweede methode tegemoet, die gebruik maakt van de zogenaamde 'verdubbelingsdosis'. Deze methode berust op het principe dat de geïnduceerde genetische veranderingen worden uitgedrukt als een toeneming van reeds bekende ziekten en afwijkingen, zoals die zich spontaan bij de mens voordoen.

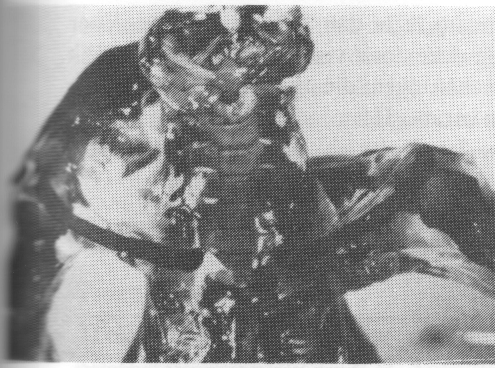
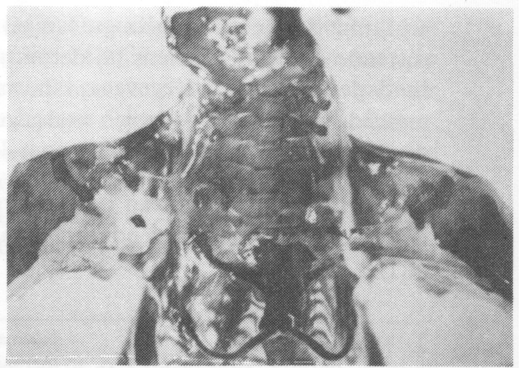
De directe methode
De risicoschattingen voor verschillende genetische effecten, berekend volgens de directe methode zijn weergegeven in tabel I. Hieruit blijkt duidelijk dat veel meer gegevens bekend zijn over spermatogonia dan over eicellen. Aan de hand van de inductie van dominante mutaties kan een indruk worden gegeven hoe de getallen in tabel I tot stand zijn gekomen.

Tabel I. Schatting van de risico's voor de inductie van verschillende types genetische schade per rad (bij lage LET[1]), toegediend bij lage doses of doseringssnelheden (4,1).

Soort genetische schade	Verwacht aantal beschadigingen per miljoen geslachtscellen na bestraling van		Aantal manifestaties in de eerste generatie per miljoen geborenen
	Spermatogonia	Eicellen	
Autosomale recessieve mutaties	60[2]	--	} 20[3]
Dominant zichtbare mutaties	zeer laag	--	
Mutaties van het skelet	4	--	
Gebalanceerde reciproke translocaties	17-87	laag	laag
Ongebalanceerde produkten van translocaties	34-174	laag	2-10[4]
X-chromosoomverlies	zeer laag	laag	--
Andere chromosoomafwijkingen			--

1) LET = Linear Energy Transfer (ionisatiedichtheid). Met streepjes is aangegeven waar onvoldoende gegevens ter beschikking staan.
2) Gebaseerd op recessief letale mutaties in de muis.
3) Totale frequentie van dominante effecten op grond van inducties van mutaties in het skelet, inclusief heterozygote effecten van recessieve mutaties.
4) Congenitale misvormingen; voorts zullen er 11-55 late abortussen optreden en 22-109 zeer vroege abortussen.

Voor de schatting van genetische effecten bij de directe nakomelingen wordt gebruik gemaakt van de gegevens over de inductie van dominante aandoeningen van het skelet bij de muis (3); zie figuur 3. De inductiefrequentie hiervan wordt geschat op 4×10^{-6} per rad per geslachtscel (na correctie voor lage doses en dosistempi). Deze frequentie kan worden omgerekend in de totale frequentie dominante mutaties met ernstig effect bij de mens, door te bepalen welk gedeelte van alle dominante mutaties gepaard gaat met skeletafwijkingen. Hiervoor wordt door anthropogenetici met grote klinische ervaring 10% als reële benadering genoemd. Voorts wordt aangenomen dat slechts de helft van de bij de muis waargenomen skeletafwijkingen als ernstige belasting zal worden ervaren. Daarom wordt de inductiefrequentie van 4×10^{-6} met tien vermenigvuldigd en door twee gedeeld.

Figuur 3
Bovenste gedeelte van muizen, waarbij het skelet met alizarine rood gekleurd is; links: normaal ontwikkeld sleutelbeen; rechts: rudimentair sleutelbeen van een mutant die door dr. U. Ehling in een stralengenetisch experiment werd waargenomen (5).

De aldus verkregen frequentie van 20 × 10^{-6} per rad per geslachtscel betekent dat na bestraling van spermatogonia met 1 rad per miljoen directe nakomelingen, twintig individuen een dominante erfelijke ziekte zullen manifesteren (4).
Gedurende de laatste paar jaar heeft Ehling uit München, die het onderzoek met skeletafwijkingen bij de muis aanvankelijk begonnen is, een intensieve studie van geïnduceerde dominant-overervende cataracten, dat is vertroebeling van de ooglens of staar, bij de muizen gemaakt. Volgens dezelfde principes als boven aangegeven voor skeletafwijkingen, kan hiermee een schatting worden gemaakt van de totale inductiefrequentie van dominant-overervende ziekten bij de mens; deze bedraagt ongeveer de helft van die welke gebaseerd is op skeletafwijkingen (5).
Voor het maken van schattingen van de translocatie-inductie in spermatogonia en jonge eicellen van de mens wordt enerzijds gebruik gemaakt van gegevens over translocatie-inductie bij het marmosetaapje en de mens zelf en anderzijds van gegevens bij de rhesusaap. Deze laatste gegevens, die in het Leidse Laboratorium voor Stralengenetica door Van Buul zijn verzameld, lijken op dit moment het meest betrouwbaar.

De methode berustend op de verdubbelingsdosis
Bij deze methode worden de genetische risico's gerelateerd aan bekende genetische ziekten die van nature bij de mens voorkomen. In feite wordt van dezelfde experimentele gegevens uitgegaan als bij de directe methode, maar deze worden op een andere manier gebruikt. Een voordeel van de verdubbelingsdosis-methode is dat de risico's in termen van bekende genetische ziektes en afwijkingen bepaald worden. Voor toepassing van deze methode dient men over de volgende gegevens te beschikken: (i) de frequentie waarmee verschillende soorten erfelijk bepaalde ziekten van nature voorkomen; (ii) een schatting in hoeverre mutatie tot de instandhouding van deze genetische afwijkingen bijdraagt, m.a.w. de bijdrage van nieuw ontstane genetische veranderingen tot deze frequentie; (iii) de verdubbelingsdosis. Hieronder verstaat men de stralingsdosis waarbij evenveel gevallen van bepaalde genetische veranderingen zouden worden veroorzaakt als er spontaan reeds optreden. Dit is dus de stralingsdosis die nodig is om de spontane frequentie van de desbetreffende genetische verandering te verdubbelen. Op grond van bij muizen verzamelde gegevens, lijkt 100 rad een goede schatting voor een verdubbelingsdosis die zowel betrekking heeft op mutaties, als translocaties bij lage doses en doseringssnelheid. De bevindingen van Neel over mortaliteit bij kinderen van overlevenden van de nucleaire explosies in Hiroshima en Nagasaki, maken het hoogst onwaar-

schijnlijk dat de verdubbelingsdosis bij de mens lager dan 100 rad zou zijn. Voor rustende eicellen (gegevens bij de muis) ligt deze dosis veel hoger, waarschijnlijk rond de 1.000 rad. Gegevens van risicoschattingen die met behulp van deze methode berekend zijn worden weergegeven in tabel II.

Tabel II. Geschat effect van 1 rad bestraling per generatie (lage LET) op een populatie van één miljoen levendgeborenen (bij een verdubbelingsdosis van 100 rad) (4,1)

Typen van ziekten	Normale frequentie (per miljoen levendgeborenen)	Effect van 1 rad per generatie	
		Eerste generatie	Evenwicht
Autosomale dominante en X-gebonden ziekten	10.000	20	100
Recessieve ziekten	1.100	zeer gering	zeer langzame toeneming
Chromosomale ziekten	4.000	38	40
Congenitale misvormingen, afwijkingen tussen geboorte en 20ste levensjaar, verschillende constitutionele en degeneratieve aandoeningen	90.000	5	45
Totaal	105.000	63	185
Percentage van huidige (normale) frequentie		0,06	0,17

De gegevens over de frequentie waarmee verschillende erfelijke aandoeningen van nature voorkomen zijn gebaseerd op een uitgebreid bevolkingsonderzoek in de Canadese provincie Brits Columbia, met een correctie hierop door UNSCEAR (1977) (4). De totale frequentie van ziekten en afwijkingen die tot het twintigste levensjaar tot uiting komt, bedraagt 10,5%. De grootste categorie van afwijkingen, namelijk 9%, wordt gevormd door ziekten met een complexe oorzaak. Men neemt aan dat 5% van deze groep door het ontstaan van nieuwe genetische veranderingen wordt veroorzaakt, zodat alleen dit gedeelte door blootstelling aan straling kan worden beïnvloed.

Met behulp van de bovengenoemde gegevens kan men dan berekenen dat door een straling met 1 rad per generatie, 185 gevallen per miljoen levendgeborenen kunnen worden verwacht, als de populatie na een aantal generaties een nieuwe genetische evenwichtssituatie heeft bereikt. Ongeveer éénderde hiervan wordt geacht in de eerste generatie tot uitdrukking te komen. In deze samenhang dient het begrip evenwicht nog enige nadere toelichting. Men neemt aan dat in een normale populatie een evenwicht bestaat tussen het ontstaan van nieuwe mutaties en de eliminatie van mutaties. Deze eliminatie kan optreden als gevolg van sterfte vóór de geslachtsrijpheid, steriliteit of misschien het niet kunnen vinden van een huwelijkspartner. Bestraling van de populatie gedurende één generatie leidt tot de verstoring van deze evenwichtssituatie, omdat de eliminatie van de geïnduceerde mutaties zich zal uitstrekken over meerdere generaties. Pas als de populatie generatie na generatie wordt bestraald met dezelfde dosis, zal er na verloop van een aantal generaties weer sprake kunnen zijn van een nieuwe evenwichtssituatie.

Risico's voortvloeiend uit de bevolkingsdosis van toepassingen van kernenergie

Met behulp van de gegevens in de tabellen I en II is het mogelijk een indruk te vormen van de mogelijke genetische beschadiging die verwacht kan worden bij een

normaal bedrijf met 3.500 MW(e) kernenergie. De totale bevolkingsdosis bedraagt 2.000 manrem per jaar voor een bevolking van 14 miljoen individuen en dus 0,16 mrem per individu per jaar (6). Met blootstelling over een reproduktieve periode van dertig jaar zou de totale geaccumuleerde dosis 5 mrem per individu bedragen. Uit de gegevens van de tabellen I en II moge blijken dat de hiermee gepaard gaande genetische schade volledig te verwaarlozen is; zeker wanneer men bedenkt dat de normale belasting met genetische afwijkingen of ziekten die tot het twintigste levensjaar tot uitdrukking komt, 105.000 per miljoen geboorten bedraagt.

Referenties

(1) P.P.W. van Buul en F.H. Sobels, *Straling in de Samenleving,* Stafleu, Alphen aan den Rijn, 1981, blz. 96-130.

(2) P.P.W. van Buul, Dose-response Relationship for X-ray-induced Reciprocal Translocations in Stemcell Spermatogonia of the Rhesus Monkey. *Mutation Research 73* (1980), blz. 363.

(3) Selby en Selby, Gamma-ray-induced Dominant Mutations that Cause Skeletal Abnormalities in Mice. I. Plan, Summary of Results and Discussion. *Mutation Research 43* (1977), blz. 357-275.

(4) Reports of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiaton (UNSCEAR) 1962, 1972, 1977. United Nations, New York.

(5) U. Ehling, Strahlengenetisches Risiko des Menschen, *Umschau 80* (1980), blz. 754.

(6) *Kerncentrales en Volksgezondheid.* Gezondheidsraad, Rijswijk 1975.

14. SOMATISCHE EFFECTEN VAN IONISERENDE STRALING

J.A.G. Davids

De schade die ioniserende straling in weefselcellen veroorzaakt betreft vooral het vermogen tot celdeling. Ionisatie van DNA-moleculen in de chromosomen leidt tot een reeks chemische reacties die tot een verandering van de chromosomen kunnen leiden. Daardoor kan de celdeling mislukken of leiden tot dochtercellen met een verminderde levensvatbaarheid. Als gevolg hiervan ontstaan directe en late ziekteverschijnselen. Dit hoofdstuk bespreekt de hoge stralingsdoses waarbij deze effecten optreden. Door straling geïnduceerde kanker is een stochastisch effect, hetgeen inhoudt dat niet de ernst, maar alleen de kans van optreden afhankelijk is van de stralingsdosis. Omdat dit betekent dat ook lage doses die kans kunnen vergroten, wordt ingegaan op de effecten bij lage doses en een laag dosistempo. Vervolgens worden de risico-schattingen besproken, waarop de dosislimieten van de ICRP zijn gebaseerd. Tenslotte wordt de recente wijziging van de dosis-schattingen voor de atoom-explosies in Hiroshima en Nagasaki kort behandeld.

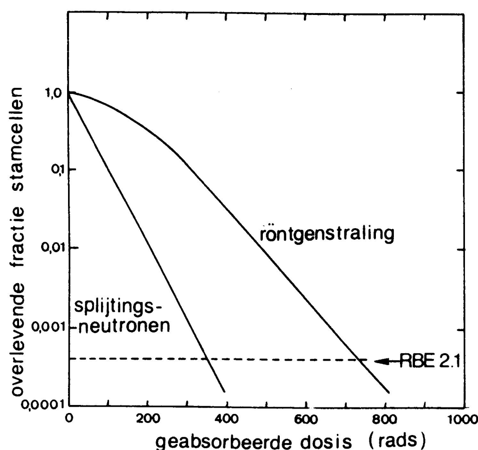
Naast de genetische of overerfbare effecten van ioniserende straling, die in het voorgaande hoofdstuk zijn besproken, onderscheidt men de somatische effecten. Hieronder worden verstaan de gevolgen die in het bestraalde individu zelf tot uitdrukking komen. In dit hoofdstuk zullen de risico's van somatische stralingseffecten worden besproken, waarbij de nadruk ligt op de risico's ten gevolge van lage stralingsdoses.

Stralingsschade aan cellen

Verschillende soorten straling, zoals röntgenstraling, gammastraling, alfadeeltjes, bètadeeltjes en snelle neutronen zijn voldoende energierijk om moleculen in de bestraalde materie te ioniseren. De ionisatie van een molecuul heeft een reeks snel verlopende chemische reacties tot gevolg, die kan resulteren in een verandering van het oorspronkelijke molecuul.
Wanneer levende cellen worden bestraald kan een verandering plaatsvinden in een molecuul dat van essentieel belang is voor het goed functioneren van de cel. In het voorgaande hoofdstuk is beschreven dat de DNA-moleculen in de chromosomen van de celkern deze belangrijke rol vervullen; met name het DNA in de geslachtscellen, vanwege de overerfbaarheid. Maar ook het functioneren van de overige cellen in het lichaam wordt gestuurd vanuit de genetische informatie die in hun celkern aanwezig is. Derhalve speelt ook bij de somatische effecten de stralingsschade aan DNA een belangrijke rol.
De celdeling of mitose is bijzonder gevoelig voor stralingsschade. De in de cel ontstane chromosoomafwijkingen kunnen zodanig zijn dat de celdeling mislukt en de cel meteen te gronde gaat. Ook kan het genetische materiaal ongelijk over de dochtercellen worden verdeeld, waardoor deze een kleinere levensvatbaarheid bezitten.

Stralingsschade aan weefsels en organen

Het effect van ioniserende straling op de celdeling blijkt een sleutelrol te spelen bij het ontstaan van de somatische stralingseffecten die het gevolg zijn van weefselbeschadiging. De eerste bevindingen hierover zijn al driekwart eeuw geleden gepubliceerd. In 1906, elf jaar nadat Röntgen de X-stralen had ontdekt, formuleerden de Franse radiobiologen Bergonié en Tribondeau hun nadien vaak geciteerde 'wet': 'cellen zijn des te gevoeliger voor straling naarmate ze morfologisch en fysiologisch minder gedifferentieerd zijn, een grotere mitosefrequentie vertonen en langer actief blijven prolifereren'.



Figuur 1
Overlevingscurven van stamcellen in het beenmerg van de muis na bestraling met splijtingsneutronen (10 rad per minuut) of röntgenstraling (30 rad per minuut) (1).

Het verband tussen de beschadiging van de prolifererende cellen in een weefsel en het optreden van de weefselbeschadiging kan worden geïllustreerd aan de hand van de stralingsschade in het beenmerg. Het beenmerg is een weefsel dat door botweefsel wordt omsloten. Het dient voor de vorming van rode bloedlichaampjes, een deel van de witte bloedlichaampjes, die de weerstand tegen infecties voor hun rekening nemen en de bloedplaatjes, die onmisbaar zijn voor de bloedstolling. De vorming van nieuwe functionele cellen van deze drie typen vindt gedurende het gehele leven plaats en gaat uit van een stamcelpopulatie die het vermogen bezit zichzelf in stand te houden en tevens cellen te vormen die zich differentiëren tot een van de drie celtypen. In figuur 1 is weergegeven hoe deze stamcelpopulatie door bestraling in aantal afneemt. Verticaal is langs een logaritmische schaal afgezet de fractie van de stamcelpopulatie die de bestraling overleeft, hetgeen in dit geval betekent: het vermogen tot deling blijft behouden. Langs de horizontale as is de geabsorbeerde dosis afgezet. De geabsorbeerde dosis is de hoeveelheid energie die het bestraalde weefsel per massa-eenheid heeft opgenomen. In de figuur is als eenheid hiervoor de rad gebruikt, die gelijk is aan 0,01 joule per kg*). De gegevens van deze figuur hebben betrekking op beenmerg van muizen die ofwel met splijtingsneutronen of met röntgenstraling zijn bestraald met een vrij hoog dosistempo.

Het verband tussen de logaritme van de overlevende fractie en de neutronendosis is geheel rechtlijnig, hetgeen betekent dat de overlevende fractie f exponentieel afneemt met toenemende dosis D volgens de functie $f = e^{-\beta D}$ waarin β een constante waarde heeft. Bij röntgenstraling is het verband ingewikkelder. Tot

*) De eenheid van de geabsorbeerde dosis in het SI-stelsel is de gray, die gelijk is aan 1 joule per kg; 1 Gy = 100 rad.

ongeveer 300 rad heeft de lijn een gebogen verloop – de schouder genaamd – en pas daarna een exponentieel verloop, dat bovendien minder steil is dan bij neutronenbestraling. Zowel de schouder als het verschil in helling dragen ertoe bij dat de splijtingsneutronen effectiever zijn dan röntgenstraling. Dit wordt uitgedrukt met het begrip Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE). De RBE is gelijk aan het quotiënt van de dosis röntgenstraling en de neutronendosis die dezelfde beschadiging teweegbrengen.

De bovengenoemde verschillen tussen splijtingsneutronen en röntgenstraling worden veroorzaakt door een verschil in lokale energiedepositie. De elektrisch ongeladen neutronen geven hun energie in het weefsel praktisch geheel af via botsingen met waterstofkernen, die vervolgens als positief geladen deeltjes met een hoge lineaire energie-overdracht (LET) een kort maar dicht spoor van ionisaties trekken. Wanneer een cel hierdoor in zijn stralingsgevoelige gedeelte wordt getroffen is hij in één keer uitgeschakeld. Röntgenstraling draagt haar energie over aan elektronen die een veel ijler en langer ionisatiespoor hebben (lage-LET-straling). Hiervan zijn meestal twee treffers nodig om de cel te doden. De functie voor röntgenstraling bevat daarom zowel een lineaire als een kwadratische dosisterm in de exponent:
$f = e^{-\beta_1 D - \beta_2 D^2}$. Omdat het tijdsverloop tussen de twee treffers van belang is, speelt bij de röntgenstraling ook het dosistempo een belangrijke rol. Wanneer de aanmaak van nieuwe cellen in het beenmerg volledig stokt, zijn de uit het beenmerg afkomstige witte bloedlichaampjes na drie à vier dagen, de bloedplaatjes na acht tot tien dagen uit het bloed verdwenen. Na neutronendoses boven 300 rad en doses röntgenstraling boven 650 rad treedt bij de muis sterfte op ten gevolge van het beenmergsyndroom, dat met infectie en inwendige bloedingen gepaard gaat. Bij iets lagere doses zijn er ondanks de zware beschadiging van de stamcelpopulatie toch nog voldoende stamcellen overgebleven om het beenmerg tijdig te repopuleren.

Bij bestralingen die binnen de dosislimieten van de *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) vallen bestaat de mogelijkheid dat een stamcel het vermogen tot deling verliest. De kans hierop is dan echter zo klein dat de stamcelpopulatie er niet merkbaar door wordt beïnvloed. Het dosisgebied waarbij de stamcelpopulatie zodanig wordt gedecimeerd dat ook de populaties van de functionele cellen tijdelijk slinken ligt ver boven de dosislimieten van de ICRP. Voor het effect van beenmergbeschadiging bestaat er derhalve een drempelwaarde. Bovendien neemt de ernst van de beschadiging toe met de dosis. Men noemt daarom de beenmergbeschadiging een niet-stochastisch effect.

Een tweede weefsel dat in het volwassen organisme intensief blijft prolifereren is het epitheel (dat is de bovenste laag van het slijmvlies) van de darm. Vooral het epitheel dat de holte van de dunne darm bekleedt heeft een snelle omzet; de functionele cellen worden al na ongeveer twee dagen in de darmholte afgestoten. De stamcellen van dit weefsel zijn minder gevoelig voor röntgenstraling dan die van het beenmerg. Het dosisgebied waarin sterfte door darmbeschadiging optreedt ligt boven 1.000 rad. Ook het epitheel van de huid is een weefsel dat gedurende het hele leven blijft prolifereren. Stralingsschade aan de huid was een vaak voorkomend euvel voor degenen die het eerst met röntgenbuizen experimenteerden.

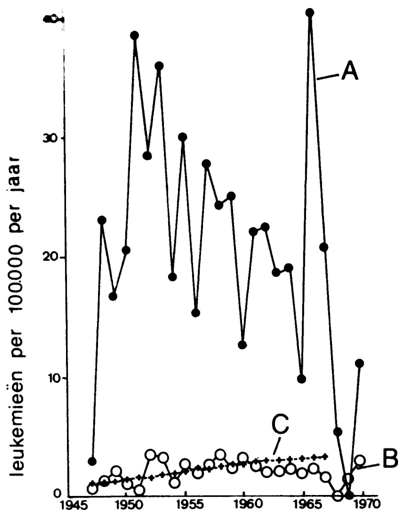
De hierboven gegeven voorbeelden van niet-stochastische effecten hebben alle betrekking op weefsels waarin de vervanging van de functionele cellen snel verloopt en de stralingsschade zich dientengevolge snel manifesteert. De gevolgen die binnen twee maanden na bestraling zichtbaar worden noemt men acute effecten.

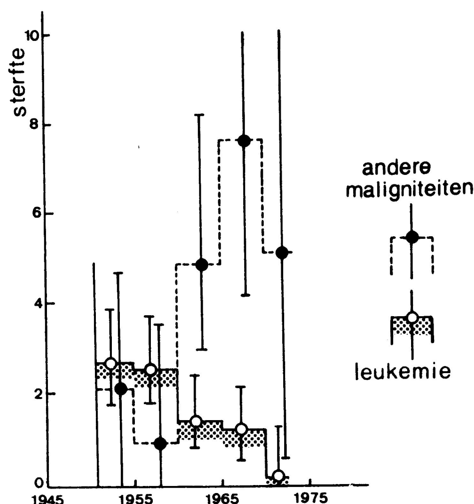
In weefsels waarin de vervanging van de functionele cellen trager verloopt, kan het veel langer duren voor het effect zichtbaar wordt. Men spreekt dan van late effecten. Voorbeelden van late effecten zijn de stralingsschade aan kleine bloedvaten, botweefsel en longen, alsmede de door straling veroorzaakte vertroebeling van de

ooglens die stralingscataract wordt genoemd. Alle zijn het niet-stochastische effecten waarvan de drempeldoses boven de ICRP-dosislimieten voor radiologische werkers liggen. Tot deze categorie behoren ook verminderde vruchtbaarheid en steriliteit van man en vrouw.
Volledigheidshalve zij hier vermeld dat naast het effect op de prolifererende cellen, ioniserende straling ook cellen die zich niet delen kan doden. Deze zogenaamde interfasedood is verantwoordelijk voor het snelle verdwijnen van de lymfecellen na een acute bestraling en treedt na een bestraling met zeer hoge doses ook in andere weefsels op.
Tijdens de groei is het aantal prolifererende weefsels groter. In een aantal weefsels is bovendien de proliferatie-intensiteit groter dan bij de volwassene. Bij bestraling na de geboorte gelden dezelfde overwegingen als die hierboven ter sprake zijn gekomen. In alle mogelijke gevallen van weefselbeschadiging zjin het niet-stochastische effecten, met drempeldoses die boven de ICRP-dosislimieten voor leden van de bevolking liggen. Deze bedragen éèntiende van de limieten voor radiologische werkers.
Tijdens de embryonale ontwikkeling is vooral de periode waarin de organen worden gevormd van groot belang. Bij de mens vindt de aanleg van de organen plaats tussen de 11e en 41e dag na de bevruchting, met uitzondering van de vorming van de hersenen, die nog een aantal weken langer voortduurt. De schaarse gegevens wijzen erop dat een dosis hoger dan 5 rad het risico van aangeboren misvormingen waarneembaar kan verhogen. Daarom bevat het ICRP-stelsel van dosislimieten een speciale dosisbeperking voor zwangeren die de limiet stelt op ongeveer 1 rad voor de gehele duur van de zwangerschap.
Wat de niet-stochastische stralingsschade aan weefsels en organen betreft kan derhalve worden geconcludeerd dat deze geheel te vermijden is wanneer de blootstelling aan straling de dosislimieten van de ICRP niet overschrijdt.

Inductie van leukemie en tumoren

Leukemie en andere vormen van kanker behoren tot de late stralingseffecten. Zij openbaren zich eerst na een zekere latentietijd die varieert van enkele jaren tot enkele tientallen jaren. De verschillende soorten kanker zijn geen specifieke stralingseffecten, maar treden ook spontaan op of kunnen door andere agentia worden veroorzaakt. Kankerinductie wordt beschouwd als een stochastisch stralingseffect, hetgeen inhoudt dat niet de ernst van het effect maar alleen de kans van optreden afhankelijk is van de stralingsdosis. De bevinding dat ioniserende straling kanker kan veroorzaken dateert uit het begin van deze eeuw. Fataal verlopende gevallen van huidkanker kwamen bijvoorbeeld vaak voor bij personen die in die tijd met röntgentoestellen werkten. In alle gevallen was er sprake van blootstelling aan zeer hoge stralingsdoses.
In de jaren vijftig werd het duidelijk dat ook doses van honderd tot enkele honderden rad een verhoogd leukemierisico met zich meebrengen. Dit bleek uit het onderzoek bij de overlevenden van de atoombomexplosies in Hiroshima en Nagasaki en het onderzoek van een groep spondylitispatiënten in het Verenigd Koninkrijk, bij wie de wervelkolom met röntgenstraling was behandeld. De in Hiroshima verzamelde gegevens over leukemie zijn in figuur 2 afgebeeld. Na een latentieperiode van twee à drie jaar nam het vóórkomen van leukemie (incidentie) in het blootgestelde deel van de bevolking toe ten opzichte van dat in het niet-blootgestelde deel. De periode van een verhoogd risico was ongeveer twintig jaar. In deze periode stierven van de blootgestelde groep die in 1950 ongeveer 29.000 mensen telde, 122 mensen aan leukemie. Ook bij de spondylitispatiënten is een verhoging van de leukemie-incidentie aangetoond.
De aanvankelijke indruk dat de bestraling alleen de leukemie-incidentie had verhoogd moest worden herzien. Latere waarnemingen in Japan hebben uitgewezen





Figuur 2
Vóórkomen van leukemie bij de overlevenden van de atoombomexplosie in Hiroshima. ***A*****: bestraalde populatie van Hiroshima;** ***B*****: niet bestraalde populatie van Hiroshima;** ***C*****: gehele bevolking van Japan (2).**

Figuur 3
Verloop van de verhoogde sterfte door leukemie en andere vormen van kanker per miljoen mensen per jaar en per rad bij de overlevenden van de atoombomexplosies in Japan. Aangegeven zijn de 90%-betrouwbaarheidsgrenzen (3).

dat na 1960 ook de incidentie van maligne (kwaadaardige) tumoren boven die van de controlegroep is gestegen (figuur 3). De latentieperiode is in dit geval vijftien jaar. Over de duur van de risico-fase verkeert men nog in het onzekere. Men verwacht dat op den duur het totale aantal door straling veroorzaakte andere maligniteiten tot vier- tot zesmaal het aantal leukemieën zal stijgen. Ook bij de spondylitispatiënten is een verhoogd risico van maligne tumoren aangetoond, na ongeveer dezelfde latentieperiode, in organen die bij de behandeling zijn meebestraald. Deze gegevens zijn in de loop van de laatste twintig jaar aangevuld met resultaten van onderzoek bij andere groepen personen die voor diagnostische of therapeutische doeleinden zijn bestraald of tijdens hun werk aan straling werden blootgesteld, zoals radiologen, uraniummijnwerkers en de *radium-dial painters*, die in de Eerste Wereldoorlog een inwendige besmetting door radium en thorium hadden opgelopen. Onderzoek in het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten toonde aan dat een diagnostische bestraling van zwangeren het risico, dat de foetus tijdens de eerste tien levensjaren een kwaardaardige ziekte zal krijgen waarneembaar verhoogde.
De gegevens van de bovengenoemde onderzoekingen worden door verschillende groepen deskundigen geëvalueerd en gebruikt om risicoschattingen te maken. Het *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) heeft op dit gebied een groot gezag verworven. De meest recente risicoschattingen van UNSCEAR zijn in tabel I samengevat. De schattingen zijn gemaakt voor een reeks afzonderlijke organen en weefsels. Naast het risico van mortaliteit is ook dat van de morbiditeit (het optreden van de leukemie of maligne tumor) vermeld. Bij leukemie en longkanker is de mortaliteit gelijk gesteld aan de morbiditeit. Bij schildklierkanker daarentegen is de kans op een succesvolle behandeling groot; de mortaliteit is hier op 10% van de morbiditeit gesteld. Het risico van sterfte door borstkanker bij vrouwen is ongeveer even groot als dat van leukemie en longkanker. De risicoschattingen in tabel I zijn gemiddelden voor de gehele bevolking.

Het UNSCEAR-rapport van 1977 bevat ook gegevens over het risico als functie van de leeftijd ten tijde van de bestraling. Hieruit blijkt dat met uitzondering van bestraling tijdens de eerste tien levensjaren de mortaliteitsrisico's ten gevolge van leukemie en andere maligniteiten toenemen naarmate de bestraling op hogere leeftijd plaatsvindt. Een uitzondering hierop is het sterfterisico door borstkanker, dat het hoogst is bij bestraling in de adolescentie en daarna met stijgende leeftijd afneemt.

Tabel I. Risicoschatting* voor kankerinductie door straling volgens het UNSCEAR-rapport 1977 (3)

bestraalde orgaan of weefsel	morbiditeit	mortaliteit
beenmerg (leukemie)	10-60	10-60
schildklier	50-150	5-15
borstweefsel vrouw	30-110	10-60
longen	25-50	25-50
speekselklieren	10-20	5
maag, lever, dikke darm, hersenen (alle tumoren)		10-15**
bot, slokdarm, dunne darm, rectum, blaas, alvleesklier, lymfatisch weefsel, slijmvliezen van de schedelholtes		2-5**

* De getallen tonen het aantal gevallen van door straling met een lage LET geïnduceerde kanker per miljoen personen per rad röntgen- of gammastraling.
** Voor elk orgaan.

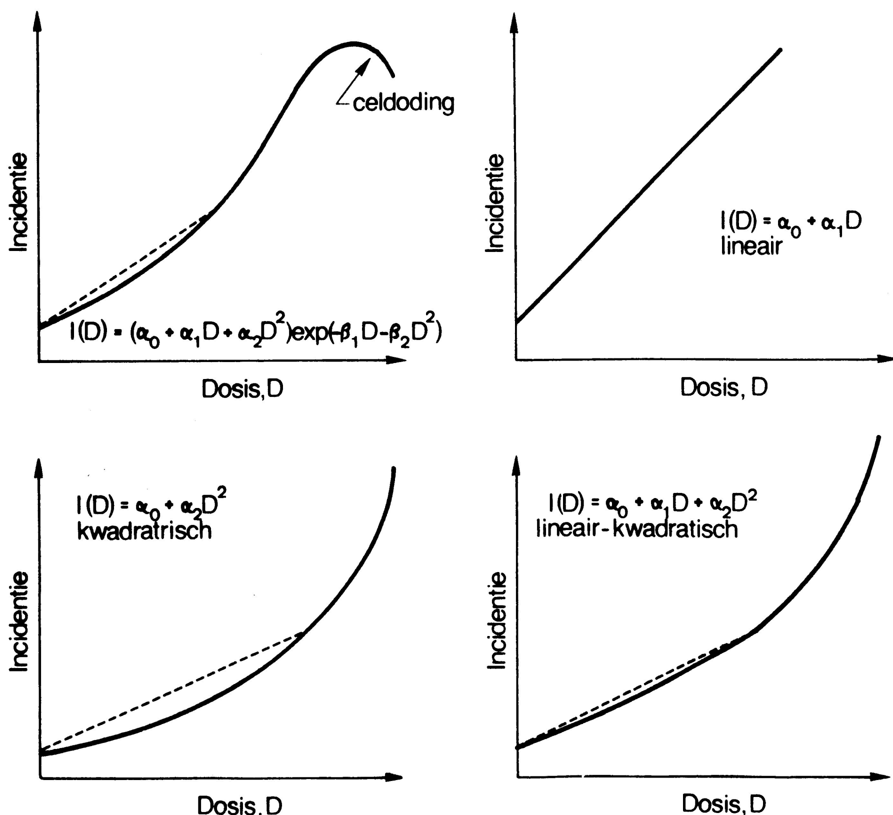
De in tabel I vermelde risicoschatting van UNSCEAR is gebaseerd op de gevolgen van doses röntgen- en gammastraling met een lage LET, variërend van 100 rad tot enkele honderden rad, waarbij bovendien het dosistempo hoog tot zeer hoog was. Wanneer onder deze omstandigheden een uniforme bestraling van het gehele lichaam plaatsvindt bedraagt de risicofactor naar schatting 40-50 leukemieën en ongeveer 200 andere fatale gevallen van kanker per miljoen personen per rad. Voor een uniforme bestraling van het gehele lichaam met kleinere doses lage-LET-straling, ongeveer tussen 10 en 100 rad, maar eveneens met een hoog tot zeer hoog dosistempo, concludeert UNSCEAR tot een wat lagere schatting per dosiseenheid: ongeveer 100 gevallen van kanker met dodelijke afloop per miljoen personen per rad. De risicofactor 100.10^{-6} rad^{-1} (honderd per miljoen per rad) geldt gemiddeld voor de gehele bevolking. Afhankelijk van onder andere leeftijd en geslacht is de risicofactor hoger of lager.

De risicofactoren voor kankerinductie door straling met een hoge LET zijn groter dan de hierboven vermelde waarden. De gegevens die voor de mens zijn verzameld hebben alle betrekking op alfastraling. Zo bedraagt de RBE voor inductie van longkanker bij uraniummijnwerkers door de alfastraling van het edelgas radon en zijn dochterprodukten 8 tot 15. De RBE voor inductie van leverkanker bij patiënten bij wie enkele tientallen jaren geleden thoriumdioxyde als contrastmiddel was ingespoten is ongeveer 20. Ongeveer dezelfde RBE-waarde geldt voor de inductie van botkanker door de alfastralers in het botweefsel van de *radium-dial painters*. In de dosislimieten van de ICRP is met deze grotere effectiviteit rekening gehouden door

de kwaliteitsfactor Q voor alfastraling gelijk te stellen aan 20, zodat het dosisequivalent H van een geabsorbeerde dosis D rad gelijk is aan $20 \times D$ rem.
De enige gegevens over een grotere effectiviteit van hoge-LET-neutronen voor kankerinductie bij de mens zijn die voor leukemie-inductie door splijtingsneutronen in Hiroshima. Zoals hieronder nog zal worden besproken zijn de hieruit getrokken conclusies door herziene dosisberekeningen op losse schroeven komen te staan. Door onderzoek met proefdieren is de grotere effectiviteit van hoge-LET-neutronen echter genoegzaam aangetoond. De ICRP heeft de Q-factor voor deze neutronen op 10 gesteld.

Het risico van kankerinductie bij lage doses en een laag dosistempo

De bestralingsomstandigheden waarmee men in de stralingshygiëne te maken heeft wijken in twee opzichten meestal sterk af van die waarvoor de hierboven vermelde risicofactoren gelden. In de eerste plaats zijn de doses tenminste één à twee orden van grootte kleiner. Bovendien zijn deze kleinere doses over een veel langere tijd verdeeld ten gevolge van een laag dosistempo en/of dosisfractionering. De lichaamsdoses die radiologische werkers ontvangen zijn voor het merendeel lager dan 1 rad per jaar; de individuele dosis voor leden van de Nederlandse bevolking tengevolge van de kernenergieproduktie is lager dan enkele millirad per jaar.
De risico's die aan deze kleine tot zeer kleine doses mogelijkerwijs zijn verbonden kunnen niet door directe waarneming worden bepaald, maar kunnen alleen uit dosis-effect-gegevens voor hogere doses worden afgeleid of geëxtrapoleerd. Over de wijze waarop de extrapolatie dient te geschieden zijn de meningen verdeeld. Illustratief is in dit verband de onenigheid binnen het *Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations* (BEIR) van de *National Academy of Sciences* in de VS, die er toe leidde dat het rapport van de commissie, *The Effects on Populations of Exposure to low Levels of Ionizing Radiation*, met een jaar vertraging uitkwam, zonder dat de commissie unanimiteit had bereikt.
Deze diversiteit van meningen is wel verklaarbaar. De wijze waarop kanker ontstaat is onbekend. Het wordt zelfs meer en meer betwijfeld of de vele verschillende vormen van kanker wat hun ontstaanswijze betreft onder één noemer zijn te brengen. Ook het mechanisme van kankerinductie door ioniserende straling is niet bekend. De initiële afgifte van energie door ioniserende straling in een cel, waardoor deze wordt getransformeerd in een oncogene cel, is zonder twijfel een zeer belangrijke schakel in een keten van processen die tot een kwaadaardige aandoening leidt. Andere parameters waarvan het belang door experimenten met proefdieren is aangetoond zijn de soort, stam, leeftijd en het geslacht van het bestraalde organisme, de aard van het bestraalde weefsel of orgaan, de mate van weefselbeschadiging als gevolg van de bestraling, de weefselkinetiek en hormonale factoren.
Het merendeel van de modellen voor kankerinductie door lage stralingsdoses heeft alleen betrekking op de initiële energie-afgifte die de transformatie tot een oncogene cel veroorzaakt. Hierbij spelen veranderingen in het DNA een belangrijke rol. Het vermogen tot proliferatie van de getransformeerde cel moet echter intact blijven.
Figuur 4 toont de verschillende dosis-effect-curven voor kankerinductie die in het BEIR-rapport zijn gebruikt. Rechts bovenaan is het lineaire model afgebeeld. De betrekking die de kankerincidentie als functie van de dosis D beschrijft bevat twee termen: α_0 is de spontane incidentie en $\alpha_1 D$ de lineaire term. Links onderaan is een kwadratische dosis-effect-curve afgebeeld. Hierbij stijgt de incidentie bij kleine doses praktisch niet maar neemt bij hoge doses zeer sterk toe. Rechts onderaan is een lineair-kwadratische curve weergegeven. De vorm hiervan hangt af van de ver-



Figuur 4
Verschillende dosis-effect-curven voor kankerinductie door ioniserende straling (4); onderbroken lijnen toegevoegd door de auteur.

houding van de coëfficiënten α_1 en α_2. Links bovenaan is wederom de lineair-kwadratische functie gebruikt, maar is tevens in rekening gebracht dat naast de stijgende kans op transformatie elke cel bij stijgende dosis tevens een toenemende kans loopt om het vermogen tot deling te verliezen. Het laatste komt tot uitdrukking in de exponentiële factor van celdoding die eerder in dit hoofdstuk ter sprake is gekomen. Deze exponentiële factor bewerkstelligt dat bij stijgende dosis de incidentie weer gaat dalen.

Van al deze dosis-effect-modellen zijn bij de mens voorbeelden bekend. De inductie van borstkanker bij de vrouw door röntgen- en gammastraling met een lage LET lijkt praktisch volgens het lineaire model te verlopen. Het kwadratische model is toe te passen op de inductie van huidcarcinomen bij de mens. In een vrij groot dosisgebied is er praktisch geen verhoging boven de spontane incidentie. De gegevens voor leukemie-inductie bij de mens passen het best in een lineair-kwadratisch model. Ook experimenten met proefdieren hebben aangetoond dat de inductie van verschillende vormen van kanker door straling met een lage LET volgens verschillende typen dosis-effect-curven verloopt. De inductie van kanker bij proefdieren door straling met een hoge LET is in de meeste gevallen te beschrijven met een lineair dosis-effect-model, waarbij in het hoge dosisgebied de incidentie daalt tengevolge van celdoding.

Uit experimenten met proefdieren is tevens gebleken dat zowel dosisfractionering als protrahering (verlaging van het dosistempo) bij een gelijkblijvende dosis straling met een lage LET een daling van de kankerincidentie tot gevolg hebben. Dit is niet het geval voor kankerinductie door straling met een hoge LET. Bij de mens is aangetoond dat protrahering van de dosis alfastraling van radium-224 de kans op

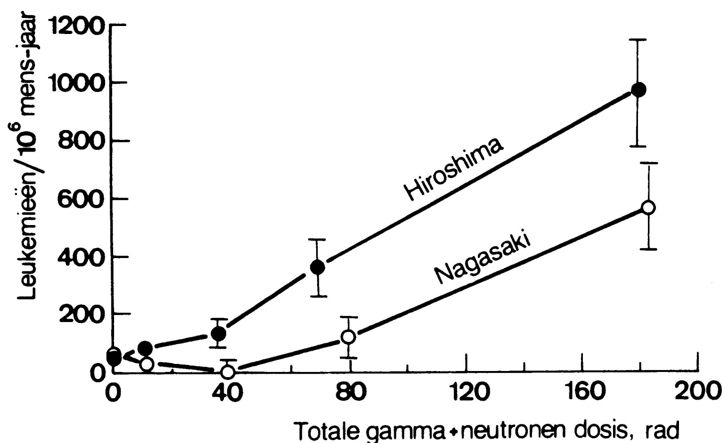
botkanker enigszins verhoogt. Ook is een verhoging van de kankerincidentie door fractionering van de neutronendosis bij muizen waargenomen.

In figuur 4 is bij de drie curven die een kwadratische dosisterm hebben in het lage dosisgebied met onderbroken lijnen een lineair verband tussen dosis en effect aangegeven. In alle gevallen is dit een conservatieve methode, die het risico van kankerinductie min of meer overschat.

De *International Commission on Radiological Protection* concludeert (5) dat voor de schatting van het individuele risico van door straling geïnduceerde fatale kanker een risicofactor gelijk aan 100 per miljoen per rem als gemiddelde voor mannen en vrouwen en voor alle leeftijden van toepassing is. Tevens adviseert de ICRP voor risicoschattingen bij lage doses en bij een laag dosistempo een lineair verband tussen dosis en effect toe te passen, maar daarbij tevens voor ogen te houden dat deze benadering kan leiden tot een overschatting van de risico's. Dit standpunt van de ICRP wordt door de tot nu toe verzamelde radiobiologische gegevens ondersteund, met dien verstande, dat de door de ICRP genoemde overschatting van de risico's vooral betrekking heeft op bijdragen van de stralingssoorten met een lage lineaire energie-overdracht (LET): de röntgenstraling, gammastraling en bètastraling, die tezamen het grootste deel van de stralingsbelasting uit kunstmatige bronnen vormen.

Nieuwe berekeningen van de stralingsdoses in Hiroshima en Nagasaki

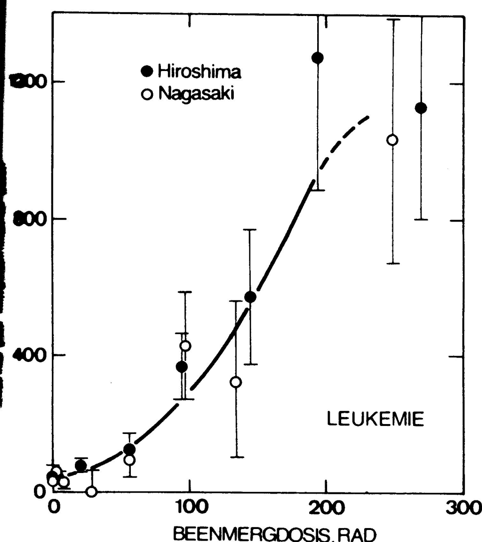
De schatting van de stralingsdoses die de overlevenden in Hiroshima en Nagasaki hebben ontvangen, was tot voor kort gebaseerd op berekeningen van de weefseldosis vrij in lucht, de *Tentative 1965 Dose* (T65D). Deze berekeningen, die in het begin van de jaren zestig door Auxier van het *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) zijn uitgevoerd, gaven aan dat de neutronenbijdrage aan de totale dosis splijtingsneutronen en gammastraling in Nagasaki heel klein was, doch in Hiroshima twintig tot vijfentwintig procent bedroeg. Dit verschil werd toegeschreven aan het verschil in samenstelling van de bommen. De Hiroshimabom bevatte uranium-235 splijtstof in een 15 cm dik stalen omhulsel dat de gammastraling veel sterker absorbeerde dan de neutronen. De Nagasakibom bevatte daarentegen plutonium-239 splijtstof omgeven door een dikke mantel van een waterstofhoudende springstof die de neutronen veel sterker verzwakte dan de gammastraling.



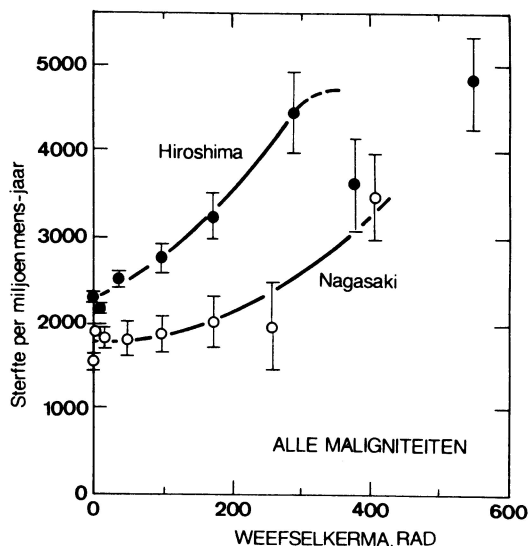
Figuur 5
Inductie van leukemie door straling in Hiroshima en Nagasaki. Langs de horizontale as is de beenmergdosis aangegeven, gebaseerd op de berekening van de *Tentative 1965 Dose* (6).

Dit verschil in neutronenbijdrage heeft men als oorzaak aangenomen van de verschillen in dosis-effect-relaties die er tussen de twee steden bleken te bestaan. Het verschil voor leukemie is weergegeven in figuur 5. Hierin is de leukemie-incidentie uitgezet als functie van de som van de doses gammastraling en neutronen in het beenmerg. Voor gammastraling is deze ongeveer de helft en voor neutronen ongeveer een kwart van de dosis vrij in lucht. Uit het verschil in verloop van de beide curven concludeerden Rossi en Mays in 1978 dat blootstelling aan splijtingsneutronen vooral in het lage dosisgebied een aanmerkelijk groter risico vormde dan tot dusver was aangenomen. Op grond van deze bevindingen gaf de *National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP) in de VS in begin 1980 een interimadvies uit ter beperking van de blootstelling van personeel aan neutronenstraling.

Inmiddels hebben Loewe en Mendelsohn in het *Lawrence Livermore National Laboratory* in de VS nieuwe dosisberekeningen uitgevoerd, waarvan de resultaten grote verschillen vertonen met de T65D-waarden. Zo is de neutronendosis in Hiroshima, afhankelijk van de afstand tot het hypocentrum van de explosie, vijf- tot tienmaal en die in Nagasaki driemaal zo klein als de T65D. De herziene dosis gammastraling in Hiroshima is op 1 km afstand tweemaal en op 2 km viermaal zo groot. De dosis gammastraling in Nagasaki is echter dertig procent kleiner dan de T65D.



Figuur 6
Inductie van leukemie door straling in Hiroshima en Nagasaki. De beenmergdosis is gebaseerd op de dosimetrie van Loewe en Mendelsohn (7).



Figuur 7
Inductie van kwaadaardige ziekten door straling in Hiroshima en Nagasaki. Langs de horizontale as is de weefseldosis vrij in lucht aangegeven, gebaseerd op de dosimetrie van Loewe en Mendelsohn (7).

Op grond van deze herziene dosisberekeningen zijn door Straume en Dobson nieuwe dosis-effect-curven gemaakt. Die voor leukemie zijn weergegeven in figuur 6. Het verschil tussen de gegevens voor Hiroshima en Nagasaki is geheel verdwenen. De gegevens passen het best bij een lineair-kwadratisch model. De helling in het lage dosisgebied tussen 0 en ongeveer 50 rad komt overeen met de risicoschattingen van UNSCEAR en ICRP. Ook voor borstkankerinductie is er een goede over-

eenstemming tussen de gegevens voor de twee steden. Wat de totale door straling veroorzaakte sterfte aan kanker betreft blijkt er vooralsnog een verschil te bestaan (figuur 7). Deze gegevens zijn echter nog niet gecorrigeerd voor het verschil in leeftijdsopbouw van de bevolking in beide steden.
De herziening van de dosisberekeningen is nog niet afgerond. Dit geldt met name voor de bijdrage van de gammastraling die door neutronenactivering van luchtbestanddelen en door radioactief verval van de splijtingsprodukten is ontstaan. Inmiddels is wel duidelijk dat de herziening van de dosimetrie slechts een gering effect zal hebben op de risicoschatting voor Hiroshima en Nagasaki. Het is dan ook zeer onwaarschijnlijk dat deze herziening zal nopen tot een wijziging van de risicoschattingen van UNSCEAR en ICRP, die op gegevens uit een aantal bronnen zijn gebaseerd.

Referenties

(1) Zie de bijdrage van J.A.G. Davids in J.F. Duplan en A. Chapiro (eds.), *Advances in Radiation Research, Biology and Medicine,* Vol. 2, New York 1973., blz. 565.

(2) *Ionizing Radiation: Levels and Effects.* Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). United Nations, New York 1972.

(3) *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). United Nations, New York 1977.

(4) *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation.* Report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR), National Academy of Sciences, Washington DC 1980.

(5) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP), Publication 26, *Annals of the ICRP,* volume 1, nr. 3, 1977.

(6) H.H. Rossi en C.W. Mays, Leukemia Risk from Neutrons, *Health Physics 34* (1978) no. 4, blz. 353.

(7) T. Straume en R.L. Dobson, Implications of New Hiroshima and Nagasaki Dose Estimates: Cancer Risks and Neutron RBE, *Health Physics 41* (1981) no. 4, blz. 666.

(8) W.E. Loewe en E. Mendelsohn, Revised Dose Estimates at Hiroshima and Nagasaki, *Health Physics 41* (1981) no. 4, blz. 663.

15. LOZINGEN VAN RADIOACTIEVE AFVALSTOFFEN

A.W. van Weers

De kerntechniek voegt radioactiviteit aan die van de natuur toe. Het grootste deel daarvan wordt gevormd door de afvalstoffen in vaste vorm, die een aparte behandeling vergen. Slechts een klein deel betreft de radioactieve afvalstoffen, die in vloeibare of gasvormige toestand door kerninstallaties in de omgeving worden geloosd. Behalve om kerncentrales gaat het hier om installaties bij de winning van uraniumerts en de opwerking van gebruikte splijtstof. De chemische aard en de halveringstijd van de geloosde radioactieve stoffen bepalen de extra stralingsdosis voor de onmiddellijke en verre omgeving van die installaties. Hierbij komen de begrippen aan de orde van het kritieke radionuclide, de kritieke verspreidingsweg en de kritieke bevolkingsgroep. De lozingen leiden als regel tot stralingsdoses voor de directe omgeving die een kleine fractie (minder dan 1%) zijn van de natuurlijke stralingsdosis. Ze kunnen daarom doorgaans niet gemeten worden, maar moeten worden berekend. De bescherming van de omwonenden wordt gebaseerd op de internationaal aanvaarde aanbevelingen van de International Commission on Radiological Protection (ICRP).

Zoals bij de bespreking van de behandeling en verwerking van afvalstromen in hoofdstuk 16 wordt uiteengezet, komt een deel van de radioactieve afvalstoffen uit de splijtstofcyclus terecht in vloeibare of gasvormige effluenten (geloosde afvalstoffen). Hoewel dit slechts een geringe fractie betreft van de totale hoeveelheid radioactieve afvalstoffen, rechtvaardigt de directe lozing van deze effluenten in de biosfeer een afzonderlijke bespreking. Deze zal worden toegespitst op die schakels van de splijtstofcyclus die in Nederland en de naburige landen voorkomen.

Ontstaan van radioactieve effluenten

De belangrijkste schakels van de splijtstofcyclus waarbij radioactieve effluenten ontstaan zijn de ertsverwerking, het reactorbedrijf en de splijtstofopwerking. Bij de winning en verwerking van uraniumertsen gaat het om het van nature in het erts voorkomende uranium en thorium en hun radioactieve dochterprodukten, waaronder radium-226. Bij het reactorbedrijf en de splijtstofopwerking gaat het om de kunstmatige radioactieve stoffen die in de kerncentrales worden gevormd. Bij de andere schakels is de radioactiviteit van de geloosde afvalstoffen van ondergeschikt belang, omdat de chemische giftigheid overweegt (produktie van lichtverrijkt uranium, fabricage van splijtstofelementen) of omdat door de aard van het proces de lozingen in het milieu vrij gemakkelijk tot geringe hoeveelheden beperkt kunnen worden (fabricage van splijtstofelementen met plutonium-239).
De winning en bewerking van uraniumerts kan leiden tot verspreiding van radioactieve stoffen in het milieu door uitspoelen van radium-226 en door ontwijken van het gasvormige dochterprodukt radon-222 uit opgeslagen mijnafval en uit afval van de chemische zuivering van het gewonnen uranium. Maatregelen tegen verspreiding van deze radioactieve stoffen zijn noodzakelijk gebleken om de lokale

concentraties in water en lucht tot aanvaardbare waarden te beperken (1). Omdat winning en verwerking van uraniumerts in West-Europa niet op noemenswaardige schaal plaats vindt wordt daarop in dit hoofdstuk niet verder ingegaan.

Kerncentrales

De kunstmatige radioactieve stoffen uit de splijtstofcyclus ontstaan bij het bedrijf van de kerncentrales. Als gevolg van de kernsplijtingen worden radioactieve splijtingsprodukten en transuranen gevormd in de splijtstof die is opgesloten in de splijtstofomhulling. Wanneer die omhulling defecten vertoont kunnen lekken optreden, waardoor deze radioactieve stoffen in het primaire koelmiddel komen dat voor de warmte-afvoer uit de reactorkern wordt gebruikt. Daarnaast ontstaan in de splijtstofomhulling en in de materialen die voor de constructie van de reactorkern en het reactorvat worden gebruikt als gevolg van de bestraling met neutronen de zogenaamde activeringsprodukten. Deze activeringsprodukten kunnen door corrosie in het primaire koelmiddel terechtkomen. Het zijn de gasvormige, opgeloste en deeltjesvormige radioactieve stoffen uit het primaire koelmiddel die via waterbehandelings-, afgas- en luchtbehandelingssystemen voor een deel als effluenten in de biosfeer worden geloosd.

De gasstroom ontstaat door ontgassing van het primaire koelmiddel (DWR) respectievelijk de condensor (KWR) en door de ventilatie van de bedrijfsruimten waar radioactieve stoffen zouden kunnen vrijkomen. De zuivering van de gasstroom vindt plaats met behulp van stoffilters en adsorptiebedden (geactiveerde koolstof voor vangst van vooral jodium-131) en met behulp van vertragingslijnen. Deze laatste worden bij de ontgassingssystemen van kokendwater- en drukwaterreactoren toegepast om daarin een belangrijk deel van de kortlevende radioactieve isotopen van de edelgassen krypton en xenon te laten vervallen, voordat de gasstroom door de schoorsteen wordt geloosd.

Systemen voor afvalwaterbehandeling dienen voor de zuivering van de in gescheiden tanks verzamelde soorten afvalwater, die afkomstig zijn van de regeneratie en het spoelen van ionenwisselaars voor zuivering van het primaire koelwater, de vloerputten van bedrijfsruimten, de afvoeren van de ruimten voor decontaminatie van gereedschappen en materialen en de wasserij en douches. Afhankelijk van de aard en de concentratie van de radioactieve en niet-radioactieve verontreinigingen wordt het water uit de verzameltanks geloosd via controletanks of behandeld. De behandeling vindt plaats met filtersystemen of met een verdampingsinstallatie, waarvan het condensaat in controletanks opnieuw op geschiktheid voor lozen wordt beoordeeld. Voor verdunning van het geloosde afvalwater wordt gebruik gemaakt van de grote stroom water waarmee de condensor wordt gekoeld. Met behulp van de systemen voor behandeling van het afvalwater blijken in de praktijk de in het milieu te lozen hoeveelheden radioactieve stoffen sterk te kunnen worden beperkt. De uit de afvalstromen verwijderde radioactieve stoffen komen dan terecht in het laag- en middelactieve vaste afval.

Splijtstofopwerking

Bij de opwerking van gebruikte splijtstof ontstaan naast de sterk geconcentreerde vloeibare afvalstroom ook een radioactieve gasstroom en middel- en laag-actieve vloeibare afvalstromen (zie ook hoofdstuk 16). De hoeveelheden radioactieve stoffen die uiteindelijk in de effluenten worden geloosd, worden sterk bepaald door de mate van zuivering van deze afvalstromen. De wijzigingen in bestaande installaties en de ontwerpen voor nieuwe zijn er op gericht de lozingen van radioactieve effluenten te verminderen. Praktijkervaring met grote installaties, speciaal gebouwd voor opwerking van de tot hoge opbrand verbruikte splijtstof van lichtwaterreactoren, is nog niet verkregen.

De gas- of dampvormige splijtingsprodukten krypton-85, jodium-131, jodium-129, koolstof-14 en tritium komen deels of geheel in de gasstroom terecht, tezamen met (in de vorm van aërosolen) een klein deel van de overige splijtingsprodukten en de actiniden. Deze gasstroom wordt bij de huidige installaties als effluent beschouwd, die via was- en/of filtersystemen door hoge schoorstenen wordt geloosd. Verschillende technieken voor de reductie van de emissie van de vijf genoemde splijtingsprodukten zijn in ontwikkeling. Deze technieken zijn voor een deel, althans op kleine schaal, al toepasbaar.
Middel- en laag-actieve vloeibare afvalstromen ontstaan voornamelijk bij de zuiveringsprocessen volgend op de eerste extractie van uranium en plutonium uit de opgeloste splijtstof, bij de zuivering van de organische extractiemiddelen en bij de gekoelde opslag van de splijtstofelementen. Reductie van de hoeveelheden afvalstoffen in de uiteindelijke effluenten wordt bereikt door gebruik te maken van precipitatie- en filtratietechnieken en verdamperinstallaties. De geloosde effluenten bevatten voornamelijk splijtingsprodukten en daarnaast uranium en isotopen van plutonium en andere transuranen. De totale hoeveelheden en de onderlinge verhoudingen van radionucliden in de effluenten zijn afhankelijk van de opgewerkte splijtstof en, in sterke mate, van de toegepaste zuiveringsmethoden.

Lozingsgegevens

Kerncentrales

De verschillende typen kerncentrales die voor de elektriciteitsproduktie worden gebruikt vertonen een aantal verschillen voor wat betreft de samenstelling van de effluenten. Deze verschillen houden verband met het in de centrale toegepaste reactortype. Drukwaterreactoren onderscheiden zich in het algemeen van de kokendwaterreactoren en de gasgekoelde reactoren door de lozing van grote hoeveelheden tritium, dat ontstaat uit borium dat aan het primaire koelmiddel wordt toegevoegd. Bij de laatstgenoemde twee reactortypen worden doorgaans grotere hoeveelheden edelgassen, aërosolen en jodium geloosd dan bij de drukwaterreactoren. Zoals al eerder werd opgemerkt hebben de toegepaste vertragingslijnen en zuiveringssystemen ook een belangrijke invloed op de hoeveelheden en onderlinge verhoudingen van de radioactieve stoffen in de effluenten.
In tabel I is een overzicht gegeven van de lozingen in de lucht door de Nederlandse kerncentrales bij Borssele en Dodewaard en de Belgische centrales bij Doel. De gegevens zijn ontleend aan overzichten die zijn opgesteld door de Commissie van de Europese Gemeenschappen (2, 3). De lozingen in water door bovengenoemde centrales zijn samengevat in tabel II. De belangrijkste radionucliden in het vloeibare afval van deze centrales zijn de geactiveerde corrosieprodukten kobalt-58, kobalt-60, mangaan-54 en de splijtingsprodukten caesium-137 en caesium-134. Op grond van ervaringen met bestaande installaties wordt verwacht dat de lozingen bij nieuwe installaties over het algemeen per geïnstalleerde MW(e) geringer zullen zijn. Dit wordt geïllustreerd door de in tabellen III en IV gegeven verwachtingswaarden voor de lozingen door lichtwaterreactoren die pas sinds kort of nog niet in bedrijf zijn genomen (4).

Splijtstofopwerking

De ervaring met lozingen door Westeuropese fabrieken en proeffabrieken voor splijtstofopwerking betreft de installaties in Engeland (Windscale en Dounreay), Frankrijk (La Hague en Marcoule), België (Mol, tot 1974) en West-Duitsland (Karlsruhe). Deze verschillen onderling sterk voor wat betreft de ontwerpcapaciteit, de aard en hoeveelheid van de opgewerkte brandstof en de systemen voor zuivering van de afvalstromen. Ook zijn de installaties in de loop der jaren herhaal-

Tabel I. Overzicht van de jaarlijkse lozingen van radioactieve edelgassen, aërosolen en jodium in de lucht bij de kerncentrales van Borssele, Doel en Dodewaard (2, 3). (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

centrale	Borssele, DWR 445 MW(e)			Doel 1+2, DWR 2×400 MW(e)			Dodewaard, KWR 52 MW(e)		
aard van de lozing	edelgassen	aërosolen	halogenen ^{131}J	edelgassen	aërosolen	halogenen ^{131}J	edelgassen	aërosolen	halogenen ^{131}J
jaar	TBq	MBq	MBq	TBq	MBq	MBq	TBq	MBq	MBq
1972	--	--	--	--	--	--	310,8	740,0	222,0
1973	11,4	--	--	--	--	--	248,0	296,0	407,0
1974	215,7	25,9	1258	--	--	--	153,9	177,6	351,5
1975	96,5	66,6	518	7,7	6660	11,1	78,0	218,3	192,4
1976	144,2	3,7	307,1	30,4	7770	185,0	230,5	133,6	166,5
1977	37,0	25,9	129,5	28,1	6290	88,8	481,5	115,0	229,4
1978	15,4	0,4	7,4	17,4	6660	--	159,2	35,0	162,8

Tabel II. Overzicht van de jaarlijkse lozingen van radioactieve stoffen in oppervlaktewater bij de kerncentrales te Borssele, Doel en Dodewaard (2, 3). (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

	Borssele, DWR 445 MW(e)		Doel 1+2, DWR 2×400 MW(e)		Dodewaard, KWR 52 MW(e)	
	tritium GBq	splijtings- en corrosie-produkten GBq	tritium GBq	splijtings- en corrosie-produkten GBq	tritium GBq	splijtings- en corrosie-produkten GBq
jaar:						
1972	--	--	--	--	92,5	75,11
1973	--	5,92	--	--	--	57,72
1974	6327,0	19,24	--	74,0	340,4	79,92
1975	2072,0	59,57	13653	381,1	629,0	46,25
1976	1517,0	31,45	10360	1842,6	851,0	12,58
1977	1468,9	15,91	17575	625,3	780,7	40,70
1978	8362,0	10,73	23384	695,6	1709,04	15,54

delijk gewijzigd. In de beide grootste fabrieken, die te Windscale en La Hague, is tot nu toe voornamelijk brandstof van gasgekoelde reactoren opgewerkt. Sinds 1976 wordt in La Hague op kleine schaal ook brandstof opgewerkt van lichtwaterreactoren. De capaciteit daarvoor zal worden uitgebreid en ook voor Windscale zijn ingrijpende wijzigingen van de fabriek in voorbereiding. Om deze redenen kunnen de ervaringen met de lozingen door deze fabrieken, noch die met de overige (proef)installaties, als karakteristiek voor toekomstige commerciële fabrieken worden beschouwd. Daarom zijn naast de lozingsgegevens voor Windscale en La Hague in tabel V ook de ontwerplozingen voor opwerkingsfabrieken in West-Duitsland en de Verenigde Staten vermeld (5).

De lozingen bij Windscale onderscheiden zich van die bij La Hague, vooral door de grotere hoeveelheden alfa- en bètastralers, die bij Windscale worden geloosd in de Ierse Zee. De daar geloosde alfa-activiteit bestaat grotendeels uit plutonium-239 en plutonium-238, afkomstig van de zuivering van het uit de brandstof afgeschei-

Tabel III. Verwachtingswaarden voor de lozingen van radioactieve stoffen in de lucht door moderne lichtwaterreactoren van 1.000 MW(e) (4). (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

radionucliden	halveringstijd	lozingen in GBq per jaar	
		drukwater-reactor	kokendwater-reactor
tritium	12,3 jaar	1110	1110
koolstof-14	5700 jaar	370	370
edelgassen:			
argon-41	1,8 uur	1850	3700
krypton-85	10,7 jaar	3700	3700
krypton-87	76 min.	1850	7400
krypton-88	2,8 uur	1850	11100
xenon-133	5,3-dag	111000	37000
xenon-135	9,2 uur	11100	55500
xenon-138	14,2 min.	1850	9250
aërosolen	≧ 70 dagen	1,1	1,1
jodium-131	8,0 dag	0,74	7,4

Tabel IV. Verwachtingswaarden voor de lozingen van radioactieve stoffen in het water door moderne lichtwaterreactoren van 1.000 MW(e) (4). (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

radionucliden	halveringstijd	lozingen in GBq per jaar	
		drukwater-reactor	kokendwater-reactor
tritium	12,3 jaar	1110	370
activeringsprodukten:			
kobalt-57	270 dagen	1,85	3,70
kobalt-60	5,3 jaar	0,74	1,85
splijtingsprodukten:			
strontium-89	51 dagen	0,07	0,37
strontium-90	29 jaar	0,04	0,19
ruthenium-106	1,0 jaar	0,04	0,11
jodium-131	8,0 dagen	0,74	7,40
caesium-134	2,1 jaar	3,70	7,40
caesium-137	30 jaar	1,85	3,70
caesium-144	290 dagen	0,19	0,19
Totaal, exclusief tritium		9,22	24,91

den plutonium. In het begin van de jaren zeventig werd meer americium-241 dan plutonium geloosd. Door toevoeging van extra zuiveringsstappen is het aandeel van dit radionuclide in de totale alfa-lozingen ongeveer tienmaal kleiner geworden. Bij La Hague overweegt het aandeel van het relatief kortlevende ruthenium-106 in de geloosde bètastralers (~80%), terwijl in Windscale de geloosde bèta-activiteit vooral uit caesium-137 bestaat (~60%). De veel grotere lozingen van caesium-137 bij Windscale houden verband met lekkage vanuit magnox-splijtstofelementen in

Tabel V. Lozingen in de lucht en in het water door de opwerkingsfabrieken bij Windscale en La Hague in 1978 en de verwachtingswaarden voor nieuwe installaties. (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

	gegevens 1973 (3)		verwachtingswaarden (5)	
	Windscale	La Hague	Barnwell (VS)	Gorleben
brandstofdoorvoer (GW(e)jaar)	1,6	2,0	~45	~45
lozingen in de lucht:	**TBq**	**TBq**	**TBq/jaar**	**TBq/jaar**
krypton-85	$2{,}59 \times 10^{4}$	$2{,}96 \times 10^{4}$	$3{,}7 \times 10^{5}$	$3{,}70 \times 10^{4}$
tritium	$2{,}22 \times 10^{2}$	$3{,}70 \times 10^{0}$	$1{,}48 \times 10^{4}$	$7{,}40 \times 10^{3}$
koolstof-14	$3{,}70 \times 10^{0}$	?	$3{,}33 \times 10^{1}$	$3{,}70 \times 10^{1}$
jodium-131	$4{,}00 \times 10^{-2}$	$1{,}11 \times 10^{-3}$	--	--
jodium-129	$2{,}59 \times 10^{-3}$	?	$1{,}85 \times 10^{-3}$	$1{,}00 \times 10^{-2}$
aërosolen (alfa)	$1{,}48 \times 10^{-3}$	$1{,}11 \times 10^{-6}$	$2{,}22 \times 10^{-4}$	$1{,}85 \times 10^{-3}$
aërosolen (bèta)	$3{,}10 \times 10^{-1}$	$1{,}11 \times 10^{-4}$	$3{,}70 \times 10^{-3}$	$1{,}90 \times 10^{-1}$
lozingen in water:				
alfastralers	$7{,}40 \times 10^{1}$	$5{,}20 \times 10^{-1}$	--	--
bètastralers	$7{,}40 \times 10^{3}$	$1{,}11 \times 10^{3}$	--	--
tritium	$1{,}11 \times 10^{3}$	$7{,}40 \times 10^{2}$	--	--

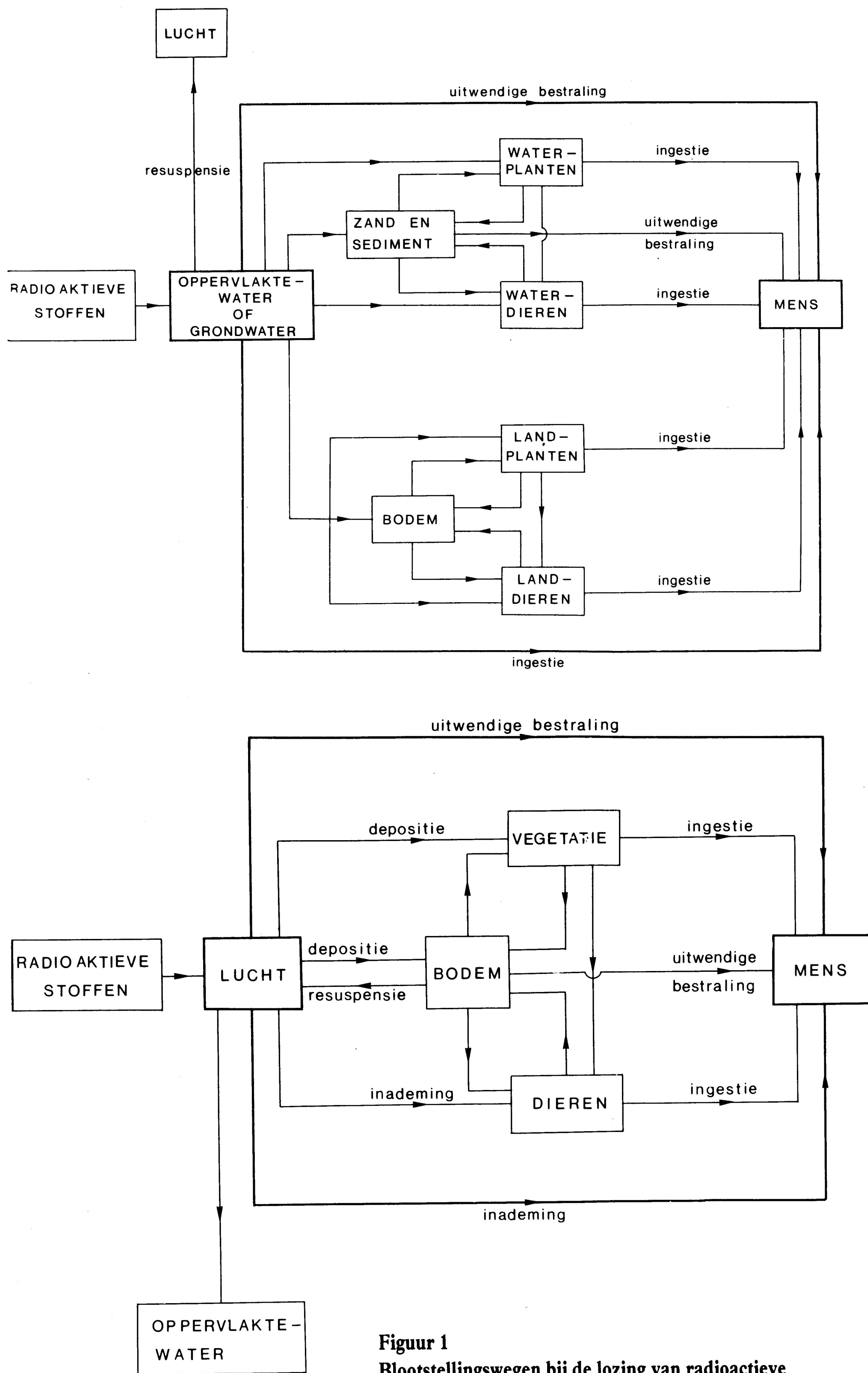
het opslagbassin en niet met het opwerkingsproces zelf. De gegevens tonen dat bij beide fabrieken gebruik wordt gemaakt van de zee voor verwijdering van radioactief afval. Die mogelijkheid is bij rivieren veel kleiner. Mede daarom zijn de ontwerpen voor nieuwe, in het binnenland gelegen fabriëken erop gericht de lozingen in zoet oppervlaktewater tot verwaarloosbare waarden te beperken. De verwachtingswaarden voor de lozingen in de lucht zijn voor Gorleben gebaseerd op gedeeltelijke verwijdering van tritium, koolstof-14, krypton-85 en jodium-129 uit de gasstromen. Omdat praktijkervaring met installaties van dergelijke grootte voor de opwerking van splijtstof met hoge opbrand nog ontbreekt, moet nog blijken of deze verwachtingswaarden realistisch zijn.

Stralingsdoses als gevolg van lozingen

Verspreidings- en blootstellingswegen

Radioactieve stoffen komen van nature in de biosfeer voor en leveren door inwendige en uitwendige bestraling van de mens hun bijdragen tot de totale stralingsdosis van natuurlijke bronnen (zie hoofdstuk 12). Ook de lozingen van kunstmatige radioactieve stoffen kunnen leiden tot de inneming van radioactieve stoffen door de mens en tot uitwendige bestraling. De wegen waarlangs de mens blootgesteld kan worden aan geloosde radionucliden zijn schematisch in figuur 1 weergegeven.

Lozing van radioactieve edelgassen in de lucht leidt alleen tot uitwendige bestraling wanneer die edelgassen niet worden ingeademd. Deeltjes- of dampvormige stoffen, zoals radioactieve aërosolen en jodium-131 kunnen direct worden ingeademd, of met neerslag en onder droge weersomstandigheden op gewassen en de bodem neerslaan. Zo kunnen ze direct of indirect in het voedsel van de mens terechtkomen. In het geval van jodium-131 is een bijzondere blootstellingsweg de depositie van het radionuclide op graslanden, waar melkvee het jodium-131 met het gras opneemt en in de melk uitscheidt. Consumptie van deze melk door de mens leidt tot opname van jodium-131 in de schildklier, een orgaan waarin jodium en dus ook jodium-131 sterk wordt opgehoopt.



Figuur 1
Blootstellingswegen bij de lozing van radioactieve afvalstoffen in de lucht (boven) en in oppervlakte- of grondwater (onder).

In het geval van lozing in zoet of zout oppervlaktewater kan blootstelling van de mens plaatsvinden door de consumptie van waterorganismen die de geloosde radionucliden direct uit het water of via hun voedsel hebben opgenomen. De mate waarin waterorganismen de radionucliden kunnen concentreren wordt aangegeven met de concentratiefactor; dat is de verhouding tussen de concentratie van het radionuclide in het organisme en die in het water. Concentratiefactoren van radionucliden in waterorganismen kunnen worden ontleend aan onderzoek in de omgeving van plaatsen waar ze worden geloosd. De concentratiefactoren kunnen ook worden gebaseerd op gegevens over het voorkomen van de niet-radioactieve isotopen van de elementen in de organismen en in het water. Dit laatste op grond van het feit dat radioactieve en niet-radioactieve isotopen van hetzelfde element in chemisch en biologisch opzicht onderling niet verschillen. Een andere blootstellingsweg is het gebruik van oppervlaktewater als drinkwater.

Kritieke wegen en kritieke groepen

Wanneer een mengsel van radionucliden in de lucht of in oppervlaktewater wordt geloosd zijn er dus theoretisch vele wegen die tot blootstelling van de mens kunnen leiden. Een belangrijke factor is daarbij de halveringstijd van het radionuclide, die mede bepaalt of ook blootstelling van mensen op grote afstand van de bron kan plaatsvinden. In de praktijk is van alle mogelijke blootstellingswegen een beperkt aantal van belang. Welke dat zijn wordt bepaald door de samenstelling van het mengsel van radionucliden dat wordt geloosd, van het milieu waarin wordt geloosd en van het gebruik van dat milieu door de mens. Die belangrijkste blootstellingswegen worden de kritieke wegen genoemd. De via die wegen blootgestelde groepen uit de bevolking zijn de kritieke groepen en de desbetreffende radionucliden uit het mengsel heten de kritieke radionucliden. Zo kan, wanneer een mengsel van radionucliden dat in de lucht wordt geloosd jodium-131 bevat, dit radionuclide het kritieke radionuclide voor de lozingen zijn. Dat is het geval wanneer de hoogste stralingsdosis als gevolg van die lozingen wordt ontvangen door mensen die in vergelijking met anderen veel melk gebruiken die afkomstig is van vee dat graast op weilanden, waar als gevolg van de ligging ten opzichte van het lozingspunt de hoogste concentraties van jodium-131 in het gras optreden. Deze 'melkweg' is dan de kritieke weg en de kritieke groep zijn de heel jonge kinderen, vooral omdat melk een groot aandeel levert in hun totale voedselpakket.

De meest blootgestelde leden van de bevolking, de kritieke groepen, zal men doorgaans vinden in de directe omgeving van de installatie waar de lozingen plaatsvinden. De bescherming van deze omwonenden wordt gebaseerd op de internationaal aanvaarde grondslagen die in hoofdstuk 11 zijn besproken. Ze omvatten onder meer de aanbevolen dosislimieten (*ICRP dose limits*) voor de blootstelling van individuele leden van de bevolking. Dit zijn algemene limieten, geldend voor de totale stralingsdosis van kunstmatige bronnen, uitgezonderd de medische toepassingen van stralingsbronnen en radionucliden. In de praktijk worden op grond van gunstige bedrijfservaringen bij het verlenen van bouw-, bedrijfs-en lozingsvergunningen voor nucleaire installaties strengere normen gehanteerd. In de Verenigde Staten zijn deze strengere normen vastgelegd in richtlijnen ter beperking van de lozing van radioactieve stoffen door lichtwatergekoelde reactoren. De Bondsrepubliek Duitsland heeft eveneens strengere grenswaarden gesteld aan de maximale individuele stralingsdosis voor personen in de omgeving van alle nucleaire installaties. In Nederland heeft de Commissie 3.500 MW van de Gezondheidsraad in 1975 geadviseerd dat de vergunningsvoorschriften voor nucleaire installaties moeten waarborgen dat geen enkele omwonende in een van de organen van zijn lichaam een dosis ontvangt van meer dan 0,3 mSv (30 mrem) per jaar (6). Die jaardosis ligt tenminste tienmaal lager dan de algemene dosislimieten van de ICRP en komt overeen met de variatie in de natuurlijke achtergrondstraling in Nederland.

Tabel VI. Maximale individuele stralingsdoses voor leden van de bevolking in de omgeving van kerncentrales in de Europese Gemeenschappen in 1978 (3). (Opmerking: De lozingsgegevens worden als regel in curies opgegeven met twee significante cijfers; door omrekening van curie in becquerel kunnen meer dan twee cijfers ontstaan, zonder dat dit betekent dat die extra cijfers ook significant zijn.)

blootstellingsweg	kritieke orgaan	percentage van EG-norm
lozingen in de lucht a)		
uitwendige bestraling door edelgassen	hele lichaam	< 0,2
uitwendige bestraling door edelgassen	huid	< 0,04
uitwendige bestraling door ^{41}Ar bij magnox-centrales	hele lichaam	<10
inhalatie van aërosolen	longen	< 0,02
inhalatie van ^{131}J	schildklier (kind)	< 0,01
inneming van ^{131}J met melk	schildklier (kind)	< 1,3 b)
inneming van ^{35}S met melk	hele lichaam	< 0,5
tritium-opname	hele lichaam	< 0,05
^{14}C-opname	vetweefsel	< 0,001
lozingen in het water:		
totaal van blootstellingswegen		<2 c)

a) De gegevens gelden voor een afstand van 500 m van het lozingspunt, op een afstand van 5 km zijn de doses een orde van grootte kleiner.
b) Geldt voor de centrale bij Winfrith (GB). Voor de overige centrales wordt een percentage van < 0,7 opgegeven.
c) Geldt voor consumptie van vis uit Lake Trawsfynydtd (GB). Voor de overige centrales wordt een percentage van < 0,2 opgegeven.

Blootstelling van kritieke groepen bij kerncentrales

In tabel VI is een overzicht gegeven van de maximale individuele stralingsdosis voor leden van kritieke groepen in de omgeving van een aantal kerncentrales in de Europese Gemeenschappen. De dosisgegevens gelden voor het jaar 1978 en zijn uitgedrukt als percentage van de ICRP-dosislimieten voor leden van de bevolking die in 1978 in de EG nog golden. Omdat de doses over het algemeen klein zijn ten opzichte van de doses uit natuurlijke bronnen kunnen ze doorgaans niet direct worden gemeten. Daarom zijn berekende doses opgegeven, die zijn gebaseerd op pessimistische veronderstellingen en die een overschatting inhouden van de maximale individuele doses. De zo berekende doses zijn lager dan 1% van de EG-limieten. Een uitzondering vormen de oude magnox-centrales. Onderzoek van gras en melk in de omgeving van de Nederlandse nucleaire installaties en in het Nederlandse grensgebied nabij nucleaire installaties in België en West-Duitsland wijst uit dat daar geen verhoogde stralingsniveaus zijn ontstaan (7).

Blootstelling van kritieke groepen bij opwerkingsfabrieken

De berekende individuele stralingsdoses als gevolg van lozingen in de lucht door opwerkingsfabrieken zijn van dezelfde orde als de in tabel VI voor kerncentrales gegeven waarden. Wanneer wordt aangenomen dat bij Windscale lozingen, overeenkomend met die in het jaar 1978, blijven plaatsvinden, dan zou op den duur als gevolg van depositie van caesium-137 op een afstand van 1 km van de installaties, het maximale individuele dosistempo stijgen tot 3% van de EG-limiet. Voor de overige radionucliden en blootstellingswegen liggen de uitkomsten tenminste tienmaal lager.

De maximale stralingsdoses als gevolg van de vloeibare lozingen in de Ierse Zee bij

Windscale kunnen direct op metingen in de omgeving worden gebaseerd. Uit de metingen van 1978 en uit gegevens over het lokale en regionale gebruik van zeevoedsel volgt dat de kritieke groep wordt gevormd door de groep plaatselijke vissers. Uit een dagelijkse consumptie van 170 gram vis, 15 gram schaaldieren en 6 gram schelpdieren door deze groep volgt een maximale dosis van 23% van de EG-limiet. Het belangrijkste aandeel wordt geleverd door caesium-137 en caesium-134 in vis.

Gemiddelde stralingsdoses

De in de voorafgaande paragrafen gegeven waarden gelden voor het kleine aantal leden van de kritieke groepen in de omgeving van de installaties. Deze groepen vormen een gering deel van het totale aantal omwonenden en een nog kleiner deel van de totale bevolking. Daarom zal de gemiddelde stralingsdosis voor de gehele bevolking veel lager zijn. In het eerder genoemde rapport van de Commissie 3.500 MW van de Gezondheidsraad wordt een geschatte waarde gegeven van 0,00015 mSv (0,015 mrem) per jaar als de gemiddelde stralingsdosis in Nederland als gevolg van de lozingen door kerncentrales met een totaal vermogen van 3.500 MW(e). Dit is het nu opgestelde vermogen, vermeerderd met de uitbreiding van 3.000 MW(e) waartoe in de Energienota 1974 in beginsel werd besloten. Deze gemiddelde dosis komt overeen met 0,003% van de EG-dosislimieten en met 0,015% van de gemiddelde stralingsdosis uit natuurlijke bronnen in Nederland.
Onder de radionucliden die door kerncentrales en opwerkingsfabrieken worden geloosd zijn er enkele die zich na lozing op regionale en wereldwijde schaal kunnen verspreiden. Dit geldt vooral voor de radionucliden: tritium, koolstof-14, krypton-85 en jodium-129 die in de lucht worden geloosd en een halveringstijd hebben die lang genoeg is voor transport over grote afstanden. Ook de in rivieren en de zee geloosde radionucliden, zoals tritium en caesium-137 kunnen tot ver van het lozingspunt gevoerd worden. Die verspreiding gaat gepaard met sterke verdunning. Deze radionucliden kunnen daarom niet alleen een bijdrage leveren aan de lokale individuele doses maar ook aan de dosis van de bevolking van een gehele regio en de wereldbevolking. Voor de bevolking in het stroomgebied van Rijn en Maas zijn berekeningen gemaakt van de te verwachten stralingsdoses in het jaar 2000. Daarbij is rekening gehouden met de regionale en mondiale verspreiding van een aantal radionucliden (4). Voor geplande, maar nog niet gebouwde nucleaire installaties zijn verwachtingswaarden voor de lozingen gebruikt (zie tabel IV en V). De gemiddelde stralingsdosis in het hele lichaam wordt in deze studie geschat op 0,00035 mSv (0,035 mrem) als gevolg van lozingen in de regio en 0,0001 mSv (0,01 mrem) door wereldwijde verspreiding van tritium en koolstof-14.

Samenvatting van de geschatte doses

De pessimistisch geschatte maximale stralingsdosis in het hele lichaam als gevolg van de lozingen in water en lucht door kerncentrales in West-Europa in 1978 lopen voor kleine groepen omwonenden uiteen van minder dan 0,01 mrem tot enkele tientallen mrem per jaar. De maximale lichaamsdoses in de omgeving van lichtwaterreactoren ligt in de orde van 0,0001 tot 0,01 mSv (0,01-1 mrem) per jaar. In de directe omgeving van de oudere typen gasgekoelde reactoren kunnen de maximale lichaamsdoses enkele tienden mSv (tientallen mrem) bedragen. De maximale stralingsdoses zijn, met de in tabel VI gegeven uitzonderingen, kleiner dan één procent van de blootstellingsnormen die in 1978 in de EG golden en verwaarloosbaar ten opzichte van de variatie in de stralingsdoses uit natuurlijke bronnen.
Van de huidige lozingen door splijtstofopwerkingsfabrieken leiden alleen de vloeibare lozingen in de Ierse Zee bij Windscale tot maximale doses die hoger zijn dan

bovengenoemde waarden. De maximale individuele dosis bedraagt voor een plaatselijke groep vissers ongeveer 25% van de EG-limieten.
De gemiddelde stralingsdoses voor de hele bevolking liggen veel lager dan de berekende maxima voor een klein aantal directe omwonenden van de nucleaire installaties. Voor de bevolking van het Rijn-Maas-gebied wordt de gemiddelde lichaamsdosis in het jaar 2000 als gevolg van de lozingen van alle nucleaire installaties geschat op 0,35 μSv (0,035 mrem) per jaar. Daarbij zou dan nog 0,1 μSv (0,01 mrem) per jaar komen van de toepassing van kernenergie elders in de wereld en de daarmee gepaard gaande wereldwijde verspreiding van een aantal radionucliden. Vergelijking met de natuurlijke achtergrondstraling in de regio van 0,75-2,6 mSv (75-260 mrem) per jaar en met de stralingsdosis door medische toepassing van stralingsbronnen en radionucliden van 0,5-0,8 mSv (50-80 mrem) per jaar toont aan dat de verwachte stralingsbelasting als gevolg van de lozingen verwaarloosbaar is ten opzichte van de stralingsbelasting uit andere bronnen.

Referenties

(1) G.C. Eichholz, *Environmental Aspects of Nuclear Power,* Ann Arbor Science Publ. Inc., Ann Arbor, Michigan 1976.

(2) *Radioactive Effluents from Nuclear Power Stations and Nuclear Fuel Reprocessing Plants in the European Community; Discharge Data, Radiological Aspects 1972-1976,* EUR-6088, Commission of the European Communities, Luxembourg, April 1978.

(3) *Radioactive Effluents from Nuclear Power Stations and Nuclear Fuel Reprocessing Plants in the European Community; Discharge Data, Radiological Aspects, 1974-1978,* V/4116/80, Commission of the European Communities, Luxembourg, September 1980.

(4) A. Bayer, *Die Radiologische Belastung der Bevölkerung der Rhein-Maas-Region, II.* Emissionen aus stationäre Anlagen, Abschätzung nach dem Stand von Ende 1980, V/2475/81, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, März 1981.

(5) *Seminar on Radioactive Effluents from Nuclear Fuel Reprocessing Plants,* Karlsruhe, 22-25 November 1977, V/2266/78, Commission of the European Communities, Luxembourg, February 1978.

(6) *Kerncentrales en Volksgezondheid,* invloed van kernenergie op volksgezondheid en milieu in Nederland bij een totale capaciteit van 3.500 MW(e). Rapport van de Commissie Kernenergie 3.500 MW van de Gezondheidsraad, Rijswijk, september 1975.

(7) *Algemene Radioactieve Besmetting van de Biosfeer in Nederland; verrichte metingen in 1979.* Verslagen, Adviezen en Rapporten nr. 65 van het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1980.

16. DE BEHANDELING EN VERWERKING VAN AFVALSTROMEN

B. Verkerk

Het afval dat ontstaat bij het winnen, bewerken en versplijten van uranium vormt in verschillende landen een knelpunt voor de verdere invoering van de kernenergie. Dit voornamelijk door het radiologische risico dat dit afval voor de mens kan meebrengen. Het is daarom nodig, reeds vóór de definitieve opberging ervan, te zorgen voor bewerkings- en verpakkingstechnieken die verspreiding van de radioactiviteit voorkomen. Vanaf het begin van de ontwikkeling der kernenergie zijn methoden voor dit doel uitgewerkt, die nu al vele jaren op verschillende plaatsen worden toegepast. In dit hoofdstuk worden deze technieken zeer in het kort beschreven terwijl ook, ontleend aan de INFCE *studie, hoeveelheden worden vermeld die als een internationale consensus ten aanzien van de afvalproduktie kunnen worden gezien.*

Radioactieve reststoffen ontstaan in de splijtstofcyclus in een bonte reeks van verschijningsvormen en karakteristieken. Gasvormige, vloeibare en vaste resten komen voor en in de drie aggregaatstoestanden treft men lage, middelmatige en hoge radioactiviteitsniveaus en korte tot zeer lange halveringstijden aan.
Hoewel in Nederland niet alle schakels van de splijtstofcyclus voorkomen, zal toch volledigheidshalve het afval van de totale cyclus worden besproken. Dit kan het best gebeuren in analogie met de presentatie door Werkgroep 7: *Radioactive Waste Management and Disposal* van INFCE, waarbij we ons hier tot twee splijtstofcycli zullen beperken, namelijk de lichtwaterreactor (LWR) met splijtstofopwerking en plutoniumterugvoer en de snelle natriumgekoelde kweekreactor. De schema's 1 en 2 (blz. 206 en 207) geven deze cycli met hun splijtstofhoeveelheden weer (1).
De produktiecijfers uit de INFCE-studie dient men te zien als een internationaal aanvaard compromis, een gemiddelde van een serie nationale cijfers. Er kunnen, afhankelijk van de bedrijfsvoering en van nationale regels en voorschriften, vrij grote schommelingen in de produktie van reststoffen en in de lozingen voorkomen. Lozingen vormen het thema van een ander hoofdstuk en blijven hier derhalve buiten beschouwing, evenals dat in de INFCE-werkgroep 7 gebeurde.
De produktiecijfers voor de afvalstromen in iedere schakel van de splijtstofcyclus worden in de tabellen I (a-d) en III (blz. 204) vermeld. Voor elke stap zal nu in het kort de behandelingswijze van de reststoffen worden uiteengezet.

Ertsverwerking

Uraniumertsen zoals ze thans gewonnen worden hebben een uraniumgehalte in de orde van 0,1 - 0,3%. INFCE nam een gehalte van 0,2% aan. Het erts wordt fijngemalen en met zwavelzuur uitgeloogd, waarbij 90-95% van het uranium in oplossing gaat. Door een extractieproces met tributylfosfaat (of een tertiair amine) wordt het element op nucleaire zuiverheid gebracht, waarna het als ammoniumdiuranaat wordt neergeslagen dat dan tot U_3O_8 wordt gecalcineerd.
De hoofdmassa van het afval is de uitgeloogde, meestal weer met kalk geneutraliseerde, gesteentebrei (zie tabel Ia) die nog resten uranium en al het radium-226

bevat. De specifieke activiteit is zeer laag, dicht bij de grens van radioactiviteit volgens de wet, maar door hun grote massa vormen de ertsresten toch in zekere mate een probleem. De radonemissie, het stuiven en het uitlogen van toxische, niet radioactieve zware metalen kan verminderd worden door afdekken met een laag aarde, eventueel een laag bitumen. Bij de aanleg van nieuwe uraniummijnen, zoals bijvoorbeeld de Rangermijn in Australië (2) worden voor de constructie van de ertsrestenvijver (*tailingspond*) en de latere verzorging daarvan strenge eisen gesteld ten aanzien van de huidige en toekomstige radiologische veiligheid. Ook de waterhuishouding van de mijn is daarbij op minimale afvoer van gecontamineerd water gericht. Mogelijk zal het nieuwe inzicht in de radiotoxiciteit van radium-226, waarvan sprake is in ICRP-publicatie no. 30, van invloed zijn op de winningsprocedure.

Tabel I. Gegevens over de radioactieve afvalproduktie, genormeerd op 1 GW(e)-jaar elektriciteitsopwekking, in de schakels van de splijtstofcylus voor lichtwaterreactoren (LWR) met plutoniumterugvoer resp. snelle-kweekreactoren (SR) (ontleend aan INFCE).

a.

afval van ertsverwerking		
	LWR	SR
volume (m^3)	34.060	342
waarin		
^{238}U(Ci)	2,1	0,02
^{230}Th(Ci)	40	0,4
^{226}Ra(Ci)	42	0,4

b.

Resten van raffinage/conversie/verrijking		
	LWR	SR
a) raffinage en conversie vaten van 200 l	95	18
waarin *U* (ton)	0,6	<0,01
^{234}Th(Ci)	2,1	0,02
b) onderhoudsafval verrijking,		
vaten van 200 l	5	-
waarin *U* (kg)	20	-

c.

Afvallen van splijtstoffabricage		
	LWR	SR
Mengoxydesplijtstof vaten, 200 l	155	318
waarin: *U* (kg)	10	20
Pu (kg)	0,5	3

d.

Afval van reactorbedrijf		
	LWR	SR
a) afval van bedrijf		
vaten van 200 l	1800	15
betonvaten	200	15
radioactiviteit (kCi)	7	2
(1 jaar gekoeld)		
b) onderhoudsafval		
betonvaten	275	470
radioactiviteit (kCi)	0,1	0,1
(1 jaar)		
c) controlestaven		
600 l vaten	10	7
radioactiviteit (kCi)	190	100
(1 jaar)		
d) afval ontmanteling		
betonvaten	125	125

Conversie en verrijking

Voor toepassing in lichtwaterreactoren moet het gewonnen uranium worden verrijkt, waartoe eerst een omzetting nodig is tot UF_6, de enige gasvormige verbinding van uranium. Daarna volgt het verrijkingsproces in een gasdiffusie- of een ultracentrifuge-installatie. In de INFCE-studie werd verondersteld dat het verarmde uranium, weer omgezet in oxyde, als afval naar een geologische opberging zou gaan.

Deze veronderstelling was nodig, omdat in de vergelijkende studie van zeven splijtstofcycli geen vermenging tussen de cycli plaatsvond. In de praktijk zal men stellig het verarmde uranium voor latere toepassing in snelle kweekreactoren bewaren. Zodoende bestaat het radioactieve afval van deze schakel in de splijtstofcyclus slechts uit de onvermijdelijke procesverliezen aan uranium en uit niet volledig decontamineerbare defecte delen van de proces-apparatuur. Ontmantelingsafval is hier van weinig betekenis, omdat voor het grootste deel van de apparatuur reiniging mogelijk is en de activiteitsniveaus bijzonder laag zijn. De hoeveelheden staan vermeld in tabel Ib.

Fabricage van splijtstofelementen

In deze stap van de cyclus ontstaan als nieuwe afvalvorm de plutoniumhoudende resten. Dit geldt zowel voor de LWR-cyclus met plutoniumterugvoer als voor de snelle reactor. De fabricage van mengoxyde voor beide cycli moet plaats vinden in de apparatuur die is opgesteld in handschoenkasten, voor de behandeling van *recycle*-plutonium zelfs voorzien van stralingsafscherming. De afvalstroom uit een dergelijke fabriek bevat dan ook veel materiaal dat van die handschoenkasten afkomstig is, bijvoorbeeld de rubber handschoenen. Om de plutoniumverliezen zo veel mogelijk te reduceren en ook om de uiteindelijke afvalstroom te beperken, wordt het organische stoffen bevattend afval in een kleine oven verbrand, waarna een deel van het plutonium uit de as wordt teruggewonnen langs chemische weg (3, 4). Een veelbelovende techniek die thans wordt ontwikkeld is de natte verassing met zwavelzuur en salpeterzuur (5).
Het bedrijfsafval bevat ook uraniumresten. Conditionering van de reststoffen bestaat uit het vermengen ervan met cement of bitumen en het verpakken van het mengsel in stalen vaten van 200 liter. Hierna volgt een meting van de plutoniuminhoud van een vat, waarvoor thans een viertal methoden bestaan en op basis daarvan een selectie naar afvalcategorie. Beneden een bepaald plutoniumgehalte kan de inhoud van het vat beschouwd worden als bèta- of gamma-afval, anders moet het als alfa-afval worden geklasseerd. Gebaseerd op een verliespercentage van 0,1% vindt men in tabel Ic de van INFCE overgenomen afvalhoeveelheden, inclusief die van onderhoud en ontmanteling.

Reactorbedrijf

Bij het functioneren van een kerncentrale ontstaan er, behalve de effluenten naar de atmosfeer en het water, meerdere afvalstromen. Het dagelijks bedrijf geeft aanleiding tot een hoeveelheid laag-actief afval, bestaande uit gecontamineerde voorwerpen, bedrijfskleding, overschoentjes, rubber handschoenen, papier, plastic etc. Het onderhoud van de installatie levert gecontamineerde defecte onderdelen, luchtfilterpakketten en dergelijke materialen op, deels laag-actief, deels van middelmatige tot hoge activiteit. Het reinigingssysteem van het primaire circuit levert een gestage produktie van middel-actief afval op, voornamelijk bestaande uit slurries op filterkaarsen en gebruikte ionenwisselaars. Het laag-actieve afval wordt in Nederland, enigszins samengeperst, in honderdlitervaten naar het ECN vervoerd en daar verder samengeperst in een 1.500-tons hydraulische pers, waarna de geperste schijven gestapeld worden in een tweehonderdlitervat en in beton worden ingebed. Dit zijn de tweehonderdliter-dumpvaten die naar de Atlantische Oceaan worden afgevoerd, samen met de zogenaamde B-containers, gewapend betonnen mantels met een volume van ca. 1 m^3, waarin een tweehonderdlitervat past. Hierin gaan de vastgemaakte slurries en ionenwisselaars. De vijfentwintig centimeter dikke betonwand zorgt voor de stralingsafscherming. Filters worden ook in dumpvaten verpakt en incidenteel voorkomende grotere metalen voorwerpen kunnen in

Tabel II.

Bedrijfsafval van Borssele (genormeerd op 1 GW(e)-jaar en voor dumping geconditioneerd)			
	1978	1979	1980
filters in vaten	125	100	-
dumpvaten van 200 l	273	140	202
betonvaten	525	458	430

de betoncontainers in beton worden ingebed.
Ter vergelijking met de INFCE-produktiecijfers in tabel Id, categorieën a) en b), staan in tabel II de praktijk-getallen voor de reactor in Borssele over de laatste drie jaar vermeld, genormeerd op 1 GW(e)-jaar elektriciteitsproduktie.
De afgewerkte splijtstofelementen worden niet tot reactorafval gerekend, omdat daaruit eerst nog uranium en plutonium wordt teruggewonnen bij de splijtstofopwerking.
Het afval dat zal ontstaan bij de ontmanteling van de installatie is in de INFCE-studie, waarvan de resultaten in tabel Id zijn overgenomen, teruggerekend per GW(e)-jaar elektriciteitsproduktie.
Voor de *entombment mode of decommissioning* zoals voor INFCE werd overeengekomen, blijkt het ontmantelingsafval slechts een kleine fractie (< 10%) van het reactorbedrijfsafval te zijn. Volgens La Guardia (6) zou de *prompt dismantling alternative*, dat wil zeggen volledige ontmanteling, 9.900 m^3 radioactief afval opleveren waarvan 306 m^3 hoog-actief, afkomstig van het reactorvat; de rest bestaat uit laag-actief beton en onderdelen. Dit zou omgerekend per GW(e)-jaar ongeveer 1.600 vaten van tweehonderd liter plus 50 betonvaten betekenen, als geen volumereductiemethode werd toegepast.

Splijtstofopwerking

De eerste splijtstofopwerkingsfabrieken waren ingericht voor de behandeling van splijtstofelementen van de gasgekoelde grafietreactoren met natuurlijk uranium, al dan niet militair. Voor de opwerking van de tot veel hogere opbrand verbruikte, verrijkte UO_2 splijtstof werden in Frankrijk en Engeland bestaande fabrieken gemodificeerd en werd pas vrij recent tot de bouw van daarvoor speciaal ontworpen installaties besloten. Het is daarom niet zo gemakkelijk de doorsnee-afvalproduktie van een opwerkingsfabriek vast te stellen. Zo heeft bijvoorbeeld Windscale een significante stroom van middel-actief afval, terwijl in de nieuwere ontwerpen gestreefd wordt naar vrijwel totale uitschakeling van deze categorie, door omzetting ervan in een fractie laag-actief en een deel dat naar de categorie hoog-actief overgaat.
Toch kunnen voor een algemeen beeld ook hier de produktiecijfers van INFCE worden genomen. Deze zijn vermeld in tabel III. Een vereenvoudigd stroomschema dat het principe van de splijtstofopwerking duidelijk maakt is als schema 3 afgedrukt op blz. 205
Het hoog-actieve afval met de splijtingsprodukten (een kleine plutonium- en uranium-rest, alsmede de overige actiniden americium, curium en neptunium) komt te voorschijn in de eerste scheidingskolom, waar door middel van extractie met tributylfosfaat in kerosine-oplossing uranium en plutonium worden opgenomen in de organische fase. Deze afvalstroom wordt zo geconcentreerd mogelijk opgeslagen in ondergrondse, gekoelde, dubbelwandige roestvrij-stalen tanks en zal later als kernsplijtingsafval (KSA) in vaste toestand worden gebracht in de vorm van borosilicaatglas. In Frankrijk werkt een verglazingsfabriek in Marcoule (7), terwijl

Tabel III. Gegevens over de radioactieve afvalproduktie, genormeerd op 1 GW(e)-jaar elektriciteitsopwekking, van de splijtstofopwerking, resp. voor een lichtwater-reactor (LWR) en een snelle-kweekreactor (SR) (ontleend aan INFCE).

Afval van splijtstofopwerking		
	LWR	SR
a) splijtstofhulzen e.d.		
vaten van 600 l	33	86
waarin *Pu* (kg)	1,4	9,0
radioactiviteit (1 jaar) (MCi)	1,4	1,6
b) verglaasd KSA		
canisters 0,18 m^3	29	23
waarin *Pu* (kg)	2,3	15,1
radioactiviteit (10 jaar) (MCi)	11,7	7,8
c) edelgassen		
gasflessen r.v.s. 50 l	17	17
radioactiviteit (MCi)	0,3	0,2
d) verarmd uranium (als UO_2)		
vaten van 200 l	13	1
waarin *U* (ton)	11,0	0,2
e) middel-actief en onderhoudsafval		
vaten van 200 l	54	35
betonvaten	83	54
waarin *Pu* (kg)	0,9	5,9
radioactiviteit (1 jaar) (kCi)	2,0	1,5
f) laag-actief afval		
vaten van 200 l	113	74
betonvaten	13	8
radioactiviteit (1 jaar) (kCi)	4	2,4
g) afval van ontmanteling		
vaten van 200 l	140	91
betonvaten	16	10
radioactiviteit (5 jaar) (kCi)	0,9	0,6

in La Hague zo'n fabriek in aanbouw is en nu ook in Windscale in licentie het AVM-proces (zie hoofdstuk 17, blz. 215) zal worden toegepast. Door de verglazing wordt het KSA in een nagenoeg onoplosbare vorm gebracht, wat voor de veiligheid van de permanente opberging van belang is.

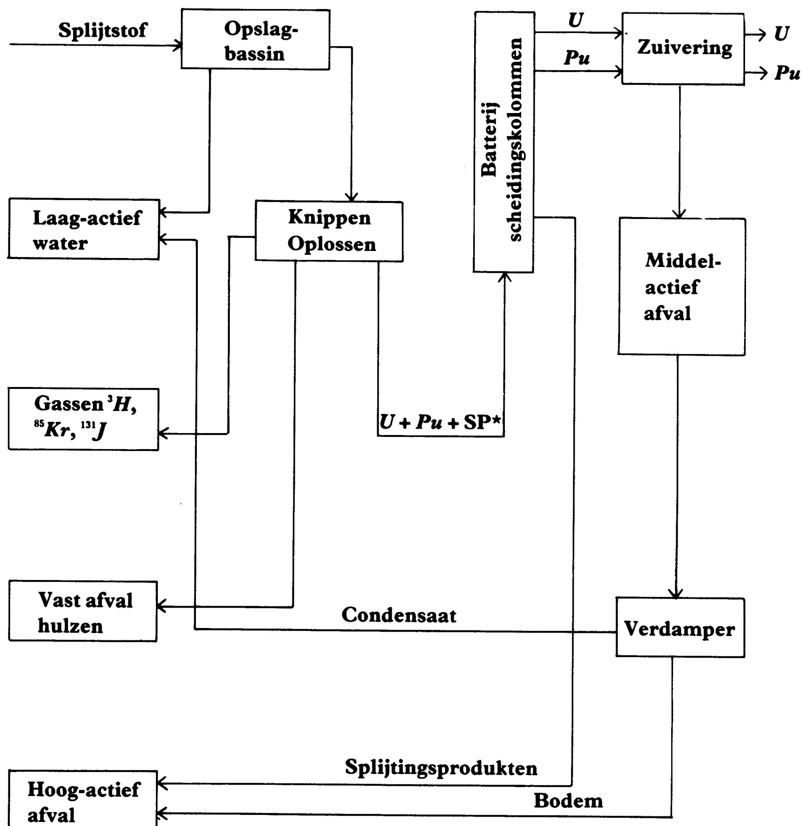
In tabel IV worden de hoeveelheden vermeld die van de belangrijkste splijtingsprodukten en actiniden in de glasblokken terechtkomen, na een afkoeltijd van tien jaar, wederom genormeerd op 1 GW(e)-jaar elektriciteitsproduktie.

De splijtstofhulzen, een categorie met eveneens hoge radioactiviteit, deels afkomstig van aanhangende onopgeloste splijtstofresten, zijn nog niet aan een standaardverwerkingsprocedure onderworpen. Ze worden deels nog in afgeschermde silo's tijdelijk opgeborgen, of, al of niet samengeperst, in beton ingebed onder afscherming opgeslagen.

De gassen worden momenteel nog als effluent beschouwd, behalve jodium, dat voor meer dan 99% wordt gevangen in absorbers en filters. Voor nieuwe installaties wordt ook de vangst (in de vorm van een vloeistof bij lage temperatuur) van krypton-85 voorzien, dat dan hetzij wordt 'vastgemaakt' door adsorptie in zeolieten, of in gasflessen onder druk wordt bewaard (zie tabel III). Het verarmde uranium uit de mengoxyde-fractie wordt niet opnieuw gebruikt en vormt een aparte afvalcategorie (zie schema's 1 en 2).

Plutonium en het overige uranium worden in verdere scheidingsstappen afgezonderd en gezuiverd voor terugvoer en verder gebruik. Hierbij ontstaat nog een afval-

Schema 3
Vereenvoudigd stroomschema van splijtstofopwerking



Tabel IV. Inventaris van de belangrijkste splijtingsprodukten en actiniden in kern-afvalglas na een afkoeltijd van tien jaar per Gigawattjaar elektriciteitsopwekking (ontleend aan INFCE).

Nuclide	halveringstijd (jaren)	LWR	SR
^{85}Kr[1]	10,8	1,8E5[3]	1,0E5
^{90}Sr (zonder ^{90}Y)	28,1	1,8E6	9,8E5
^{99}Tc	2,1E5	5,0E2	4,5E2
^{129}J[1]	1,7E7	1,3E0	8,4E1
^{135}Cs	3,0E6	1,2E1	3,4E1
^{137}Cs (zonder ^{137}Ba[2])	30,0	2,9E6	2,8E6
^{154}E	16	2,2E5	2,9E5
^{235}U	7,1E8	6,0E3[4]	8,0E4
^{238}U	4,5E9	1,2E1	7,0E$\bar{2}$
^{237}Np	2,1E6	1,5E1	3,9E0
^{238}Pu	89,0	2,2E3	1,1E4
^{239}Pu	2,4E4	1,8E2	1,3E3
^{240}Pu	6,8E3	2,0E1	1,8E3
^{241}Pu	14,6	4,4E4	1,3E5
^{241}Am	433	1,7E4	7,7E4
^{242}Am[2]	152	1,3E3	3,5E3
^{243}Am	7,7E3	2,8E3	1,5E3
^{243}Cm	32,0	3,0E2	1,4E3
^{244}Cm	18,1	5,8E5	3,4E4

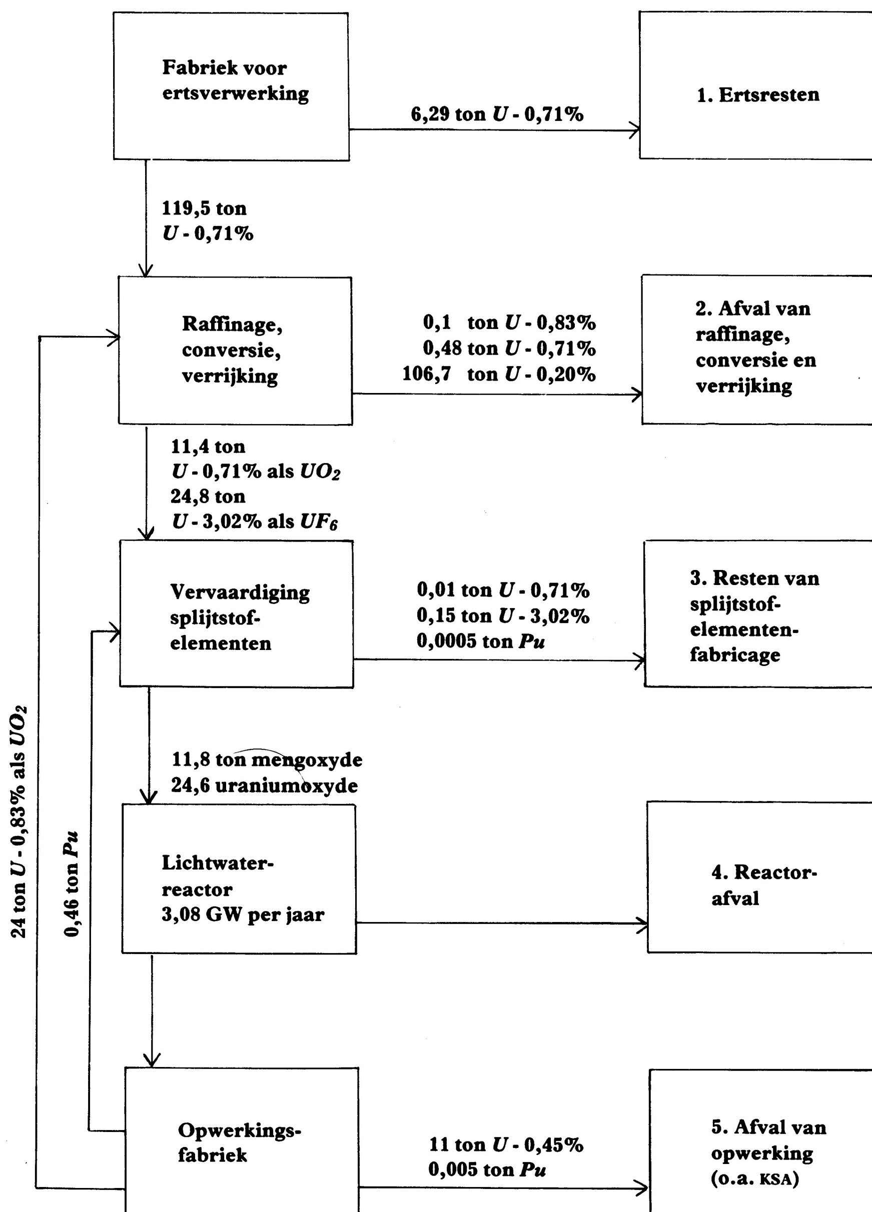
[1] komt niet in het glas terecht
[2] aangeslagen toestand
[3] 1,7E7 betekent $1,7 \times 10^{7}$
[4] 1,2E1 betekent $1,2 \times 10^{1}$

stroom, het gecontamineerde organische oplosmiddel, dat gewoonlijk gezuiverd wordt en gerecirculeerd. De waterige fractie van deze zuivering kan, via een indampstap, een zwak-actieve effluent en een fractie die aan het hoog-actieve afval wordt toegevoegd opleveren, maar kan ook als een stroom middel-actief afval worden geconditioneerd, bijvoorbeeld door indampen en mengen van het residu met

---

Schema 1

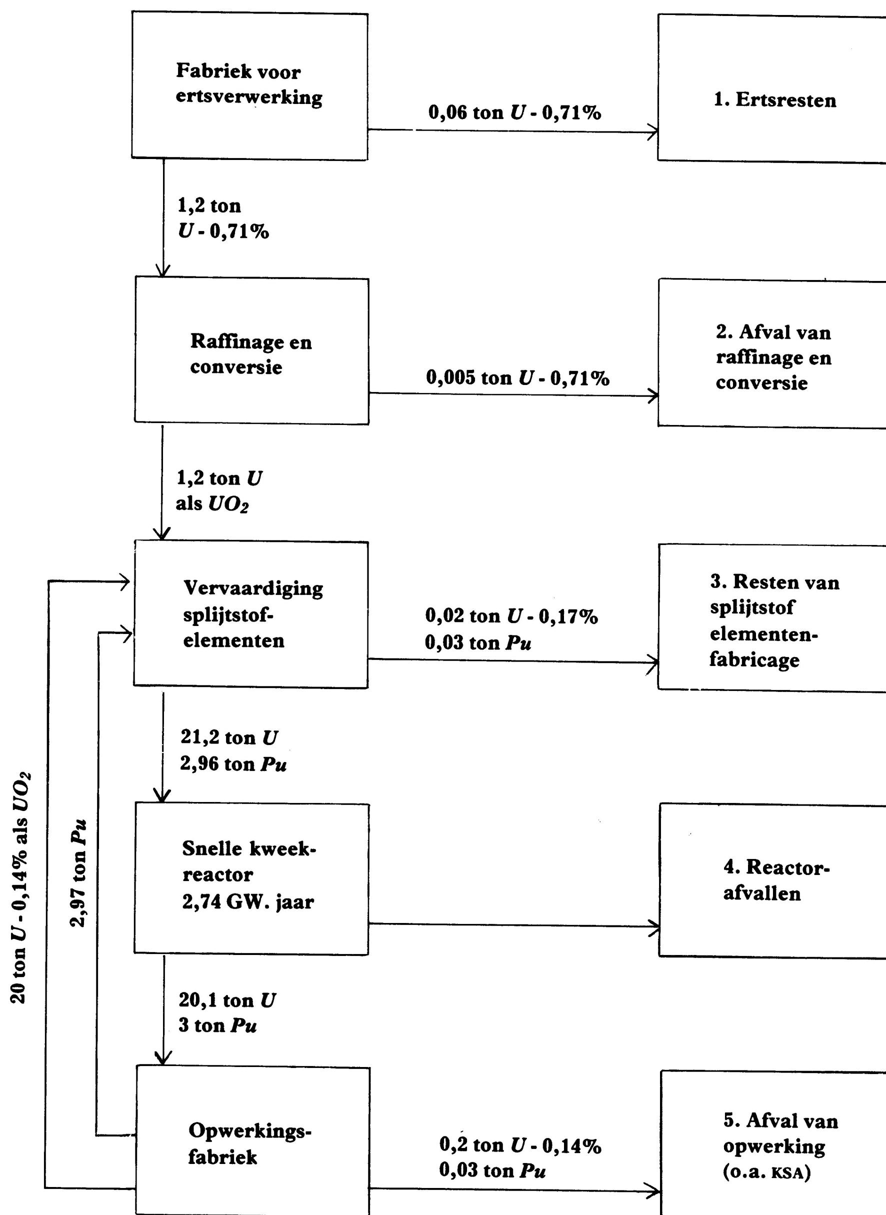
Stroomschema voor zware elementen in de splijtstofcyclus van de lichtwaterreactor met plutoniumterugvoer. Massa's genormeerd op één Gigawattjaar geproduceerde elektriciteit (GW(e)-jaar) (ontleend aan INFCE)



bitumen in een zogenaamde *extruder*. Zoals bekend zal volgens recente opwerkingscontracten de opwerker gerechtigd zijn te zijner tijd het geconditioneerde kernsplijtingsafval naar het land van herkomst terug te zenden. In het licht van deze optie is het gewenst dat spoedig een standaardisering voor het afvalgehalte van het glas en van de glascontainers zal plaatsvinden.

Schema 2

Stroomschema voor zware elementen in de splijtstofcyclus van de snelle kweekreactor. Massa's genormeerd op 1 GW(e)-jaar elektriciteitsproduktie (ontleend aan INFCE)



Referenties

(1) *Waste Management and Disposal.* Report of INFCE Working Group 7, International Atomic Energy Agency, Wenen 1980.

(2) L.J. Bath, J.W. Farthing en R.K. Warner, Development of the Alligator Rivers Uranium Deposits. *Atomic Energy in Australia 23* (1980), blz. 12.

(3) J.M. Auchapt, *Etude de Procédé, de la Technique et du Comportement en Routine de l'Incinerateur Alpha de Marcoule,* Proceedings of the NEA Seminar on Management of Plutonium-contaminated Solid Waste, Marcoule 1974, blz. 155.

(4) H. Soulier, *Incinerateur de Déchets Riches en Emetteurs Alpha de Marcoule. Fonctionnement,* Proceedings of the NEA Seminar on Management of Plutonium-contaminated Solid Waste, Marcoule 1974, blz. 163.

(5) *Workshop on Acid Digestion,* Richland, Wa (USA), 7-9 October 1980. Organisation for Economic Coordination and Development, Nuclear Energy Agency. Parijs, januari 1981.

(6) T.S. La Guardia, Nuclear Power-Reactor Decommissioning, *Nuclear Safety 20* (1979) no. 1, blz. 15.

(7) *Le Choix de la Vitrification pour le Confinement des Déchets Nucléaires de Haute Activité,* Commissariat à l'Energie Atomique, Notes d'Information no. 4, april 1979.

17. OPWERKING VAN SPLIJTSTOF EN HOOG-RADIOACTIEF AFVAL

J.N.C. van Geel

Kwam in het voorgaande hoofdstuk de globale aanpak van de afvalstromen aan de orde, hier en in het volgende hoofdstuk gaat het voornamelijk over de aanpak van het kernsplijtingsafval. Ook al gaat het om verhoudingsgewijs kleine hoeveelheden, toch vormt dit afval door zijn sterke en langdurige radiotoxiciteit het voornaamste probleem. Dit hoofdstuk concentreert zich op de afscheiding van splijtingsprodukten uit de nog waardevolle – veel energie bevattende – splijtstof. Deze techniek blijkt ruimschoots binnen de ICRP-normen te kunnen blijven en wordt op industriële schaal toegepast. Zij bestaat uit het zogenaamde purexproces, waarin een organisch extractiemiddel wordt toegepast. De splijtingsprodukten worden tenslotte in het AVM-proces in boriumhoudend glas ingesloten.

Inleiding

In tegenstelling tot fossiele brandstoffen zoals kolen en olie, die in energiecentrales nagenoeg volledig opbranden, kan nucleaire splijtstof niet in een reactor blijven totdat zij helemaal verbruikt is. De belangrijkste oorzaak hiervan is, dat gedurende het reactorbedrijf een serie splijtingsprodukten ontstaat die de eigenschap hebben neutronen te vangen, waardoor deze onttrokken worden aan de splijtingsreacties. Omdat de concentratie aan splijtingsprodukten tijdens het reactorbedrijf toeneemt, vermindert het aantal voor splijting beschikbare neutronen steeds meer, totdat het tenslotte tot een volledig doven van de kettingreactie komt.

Er bestaan nu twee mogelijkheden om de bestraalde splijtstofelementen verder te behandelen.

a. De elementen worden in hun geheel als afval beschouwd en dienen zodanig te worden verpakt en opgeborgen, dat geen gevaar meer bestaat voor het vrijkomen van de radioactieve splijtingsprodukten uit de bestraalde splijtstof met de kans dat ze in contact komen met de biosfeer. Deze manier van splijtstofgebruik, die uiteraard een relatief geringere energie-opbrengst uit de uraniumdelfstof haalt, wordt vaak de 'open kringloop' of 'wegwerpcyclus' genoemd.

b. Een andere methode bestaat hierin dat de bestraalde splijtstofelementen opgewerkt worden. Alle gevormde splijtingsprodukten en onbruikbare componenten worden chemisch gescheiden van het nog bruikbare uranium en van het tijdens het reactorbedrijf gevormde splijtbare plutonium. Deze cyclus wordt doorgaans aangeduid met de term 'gesloten splijtstofcyclus' omdat het hergebruik van de splijtstof hierin is opgenomen.

In beide bovengenoemde splijtstofkringlopen ontstaat hoog-radioactief afval, echter in totaal verschillende vormen. In het eerste geval bevindt het afval zich nog in het bestraalde splijtstofelement en is het gemengd met uranium en plutonium. In het tweede geval bevindt het afval zich in opgeloste vorm, namelijk in de vorm van nitraatzouten, in een salpeterzure vloeistof.

De technische *know-how* en de praktische ervaring op het gebied van de opwerking van splijtstoffen waarover wij in Nederland beschikken, dateren uit de tijd dat Nederland aandeelhouder was in de onderneming Eurochemie te Mol in België.

Eurochemie werd opgericht in 1959, op initiatief van het agentschap voor nucleaire energie van de OESO. Nederland, dat ongeveer 7% van het beginkapitaal bezat, trok zich op 25 juni 1975 terug en maakt sindsdien geen deel meer uit van het beheer van deze maatschappij.
Voor de kernenergiecentrales in Borssele en Dodewaard, die tezamen per jaar ongeveer 15 ton bestraalde splijtstof produceren, heeft Nederland opwerkingscontracten afgesloten met Cogéma in Frankrijk en BNFL in Groot-Brittannië, die lopen tot na 1990. In geen enkel contract is echter de definitieve opslag gegarandeerd van het hoog-radioactieve afval in het land waar de opwerking plaatsvindt. De mogelijkheid bestaat dus dat wij dit afval terugkrijgen in een vorm, waarin het niet geschikt is voor opslag in Nederland.
In de ons omringende landen ligt de problematiek nog directer. Duitsland zoekt naar een vestigingsplaats voor een opwerkingsfabriek van 1.500 ton bestraalde splijtstof per jaar. Het Belgische parlement beslist binnenkort of de opwerking in Mol hervat wordt om voor een deel aan de eigen behoefte aan opwerkingscapaciteit te voldoen. In december 1978 werd een conventie gesloten tussen Eurochemie en de Belgische regering, waarbij besloten werd de maatschappij in fasen over te dragen aan de Belgische overheid. België staat dus aan de vooravond van een belangrijke beslissing.

De gesloten splijtstofcyclus

Zowel bij een open als bij een gesloten splijtstofcyclus, afgebeeld in figuur 1, staat de kernreactor centraal die licht-verrijkt uranium (3%) als grondstof verbruikt om energie te leveren. De bestraalde splijtstof wordt naar een opwerkingsinstallatie gebracht, waar het nog bruikbare uranium en plutonium chemisch worden gescheiden van de niet bruikbare splijtingsprodukten. Dit levert dan drie fracties op:
1. het uranium dat doorgaans naar een verrijkingsinstallatie wordt gevoerd, waar het gehalte aan uranium-235 wordt opgevoerd tot ca. 3%, om daarna tot nieuwe splijtstofelementen te worden verwerkt;
2. het plutonium dat geschikt is voor de kernreactoren die met mengsels van uranium- en plutoniumoxyde werken en tevens voor snelle-kweekreactoren;
3. de splijtingsprodukten, die geen economische waarde hebben en na conditionering in stabiele chemische vormen eerst tijdelijk en ten slotte definitief in daartoe geschikte opslagplaatsen worden opgeborgen.

Is opwerking economisch verantwoord?

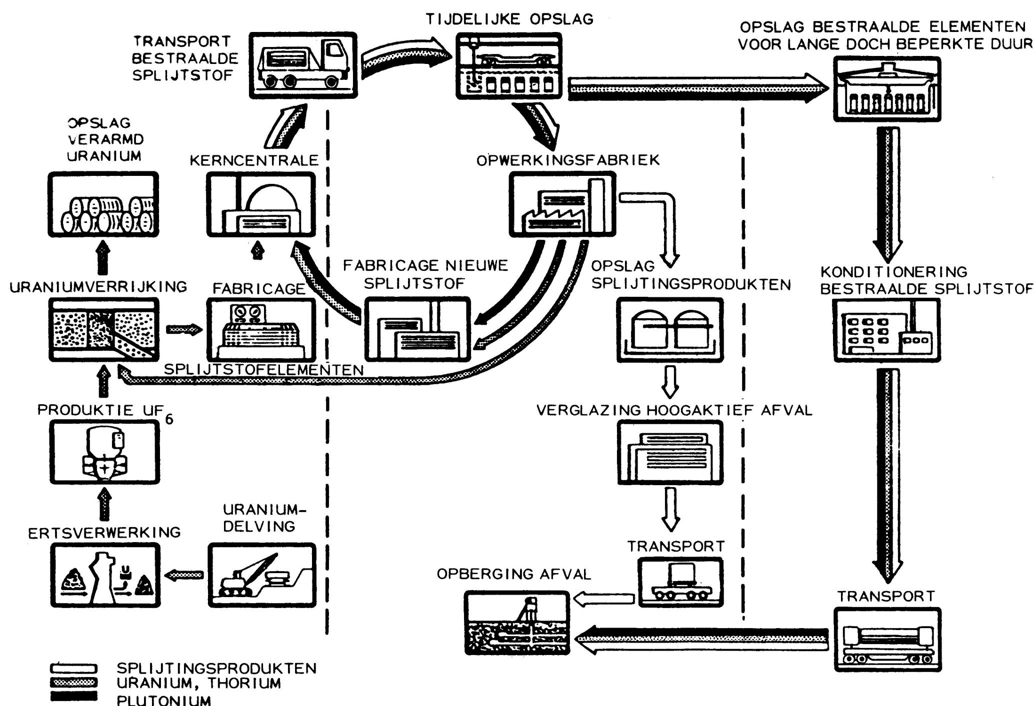
In feite concentreert de hedendaagse besluitvorming zich rond twee alternatieve gesloten kringloopprocessen.
a. Hergebruik in thermische lichtwater- en zwaarwaterreactoren, dus in reactoren van het nu gangbare type. Deze kringloop wordt verder gemakshalve aangeduid met thermische kringloop.
b. Hergebruik in snelle-kweekreactoren, dus reactortypen van de tweede generatie. De kringloop wordt veelal aangeduid met de snelle kringloop.
Beide kringlopen hebben in vergelijking met een open cyclus voor- en nadelen.
Tabel I toont ons de jaarlijkse behoefte aan natuurlijk uranium voor een centrale van 1.000 MW(e). Voor een open cyclus in thermische reactoren betekent dit een consumptie van 210 ton natuurlijk uranium per jaar. Bij hergebruik van uranium en plutonium in thermische reactoren is de consumptie gezakt tot 60% van die voor de open cyclus. Bij integratie van kweekreactoren, dus toepassing van de snelle kringloop, hebben we nog slechts 1,2% van de uranium grondstof nodig. Er dient wel te worden vermeld, dat deze getallen betrekking hebben op een toestand van evenwicht tussen de materiaalstromen binnen de kringloop.

Tabel I. Jaarlijkse behoefte aan natuurlijk uranium (onveranderlijke toestand) voor een 1.000 MW(e)-centrale

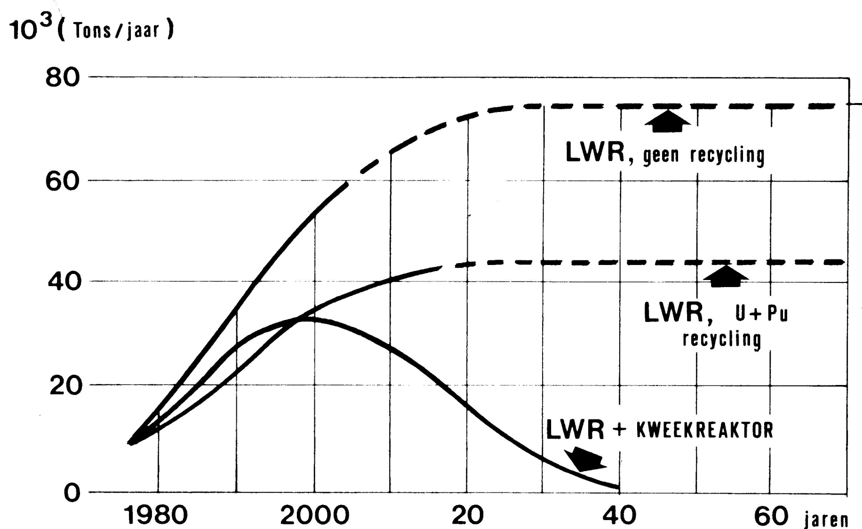
thermische reactoren		
- geen opwerking	210 ton per jaar	} (60%)
- hergebruik van *U* en *Pu*	130 ton per jaar	
snelle kweekreactoren	2,5 ton per jaar (1,2%)	

De economische voordelen van het opnieuw gebruiken van uranium en plutonium in thermische reactoren zijn
- een vermindering van de jaarlijkse behoefte aan natuurlijk uranium met 40% en
- een vermindering van de jaarlijkse scheidingsarbeid voor uraniumverrijking met 25%.

Betekent dit nu ook dat bij hergebruik van bestraalde splijtstof de kilowattuurprijs gevoelig zal dalen?
De studies die in Frankrijk enkele jaren geleden werden gemaakt tonen aan, dat de kosten van de splijtstofcyclus 28% bedragen van de prijs van kernenergie. Het aandeel van de opwerking in de prijs van kernenergie bedraagt slechts 4,7%, terwijl de kostenaandelen van natuurlijk uranium en van verrijking respectievelijk 11 en 9% bedragen. Uit wat voorafgaat blijkt echter dat het opnieuw gebruiken van de produkten van de opwerking het juist mogelijk maakt deze laatste twee uitgavenposten te verminderen. Men moet ook rekening houden met minder kwantificeerbare factoren, zoals de betalingsbalans, het gebruik van kapitaal, arbeid, kennis en industriële infrastructuur, de lange aanloop die de opzet van programma's in verband met kernenergie vergt, het probleem van de toekomstige schommelingen in bijvoorbeeld de prijs en de beschikbaarheid van energiebronnen.
De hogere investeringskosten die nodig zijn om een gesloten kringloopsysteem op te bouwen en de hoge exploitatiekosten zullen echter de eerste tijd zeker niet tot belangrijke dalingen van de kilowattuurprijs leiden. Mocht echter de prijs van natuurlijk uranium gevoelig stijgen dan wordt opwerking natuurlijk interessanter. Maar zelfs als de investerings- en exploitatiekosten van een opwerkingsfabriek gelijk zijn aan de huidige besparing op de aanschaf- en verrijkingskosten van uranium, is een gesloten kringloop interessant voor landen die uranium moeten importeren. Voor het importerende land betekent dit een verbetering van de nationale betalingsbalans.
De geschatte behoefte aan uraniumgrondstof voor de landen van de Europese Gemeenschappen hangt uiteraard samen met de te verwachten elektriciteitsconsumptie in de EG en met de hoeveelheid die daarvan door kernenergiecentrales zal worden geproduceerd. We zullen ons hier baseren op het minimale groeiritme en aannemen, dat het totale elektriciteitsverbruik in de EG over vijfentwintig jaar een maximum zal hebben bereikt en dan niet meer zal stijgen (1). Verder nemen we aan dat de EG-landen een maximale inspanning realiseren om het verbruik van fossiele energiebronnen binnen twintig jaar op het niveau van 1981 terug te brengen, door de resterende energiebehoefte te dekken met behulp van kernenergie. Figuur 2 laat zien wat de uraniumbehoefte zal zijn wanneer
a. het uranium niet opnieuw gebruikt wordt;
b. hergebruik via thermische reactoren wordt bewerkstelligd;
c. hergebruik via kweekreactoren plaatsvindt.
De figuur maakt duidelijk dat de behoefte aan uranium de eerste twintig jaar nog weinig verschillend is voor de drie scenario's, maar dat de verschillen markanter worden naarmate de tijd voortschrijdt. Het verschil tussen een open cyclus en een



Figuur 1
De open en gesloten splijtstofkringloop

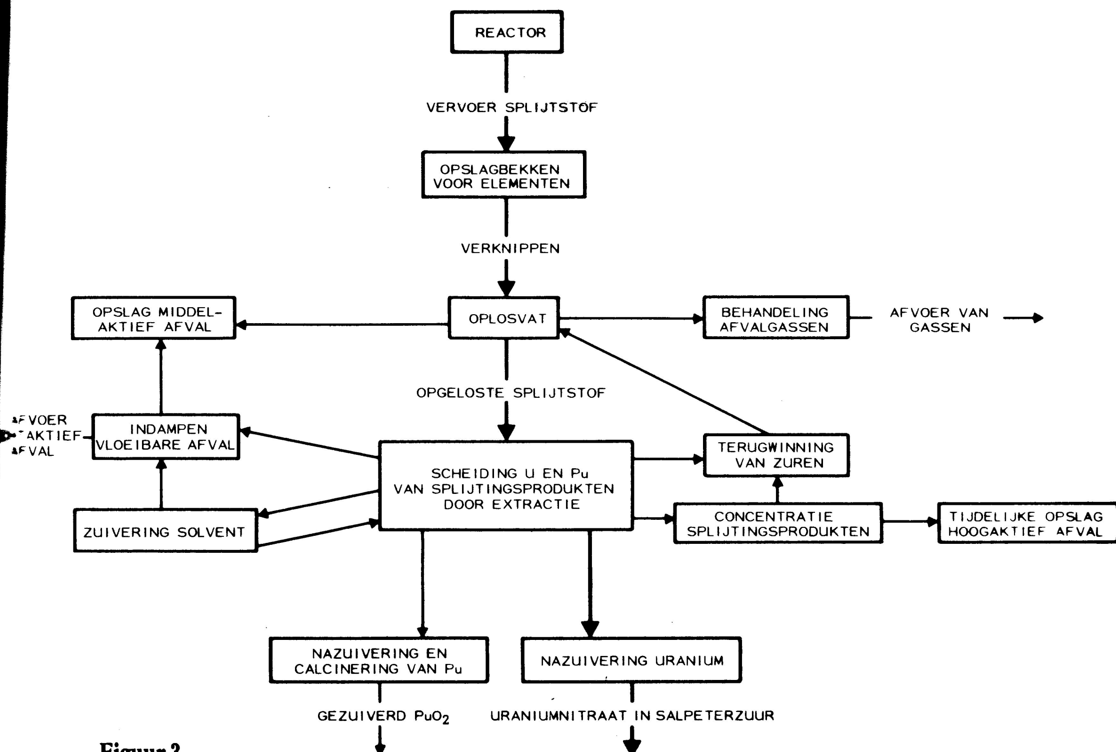


Figuur 2
Behoefte aan natuurlijk uranium in de Europese Gemeenschap gebaseerd op minimaal energieverbruik

gesloten kringloop in thermische reactoren stabiliseert zich binnen veertig jaar op een hoeveelheid van 30.000 ton uranium per jaar. Dit betekent, bij een uraniumprijs van honderd dollar per kilogram, voor de EG-landen een deviezenbesparing van rond 3 miljard dollar per jaar.

De stand van de technologie

De basistechnologie voor opwerking van bestraalde splijtstof, de verwerking van het plutonium tot splijtstofelementen, de verrijking van uranium en de versplijting van deze elementen in lichtwaterreactoren zijn nu voldoende bekend en op industriële schaal ontwikkeld en aangetoond. Figuur 3 geeft het principeschema weer van de opwerkingsmethode die sinds 1958 op industriële schaal wordt toegepast, het zogenaamde purexproces. Dit proces heeft sedertdien weinig veranderingen ondergaan. Slechts de wijze waarop de elementen worden opgelost is de laatste jaren gewijzigd. Vroeger werd het bekledingsmateriaal van de eigenlijke splijtstof eerst afzonderlijk opgelost in een daartoe geschikt oplosmiddel; vervolgens werd de eigenlijke splijtstof opgelost in salpeterzuur. Thans worden de splijtstofstaven eerst in kleine mootjes gehakt en wordt de bestraalde splijtstof uit het bekledingsmateriaal geloogd. Dit met het doel uiteindelijk minder bewerkelijk secundair afval te verkrijgen. Een tweede wijziging is dat uranium en plutonium niet meer worden afgezonderd, maar tezamen worden gelaten. Dit mengsel kan dan tot nieuwe reactorsplijtstof worden verwerkt. Zo verkleint men de kans dat bij moedwillige ontvreemding onbevoegden over gezuiverd plutonium kunnen beschikken.
Tot nu toe hebben de fabrieken in Windscale en La Hague bijna 25.000 ton splijtstofelementen met natuurlijk uranium uit gasgrafietreactoren opgewerkt. Daarnaast hebben de fabrieken in Europa, de Verenigde Staten en Japan meer dan 850 ton bestraalde splijtstofelementen uit de lichtwaterreactoren van de huidige centrales opgewerkt. Eurochemie heeft in Dessel 100 ton splijtstof van dit type opge-



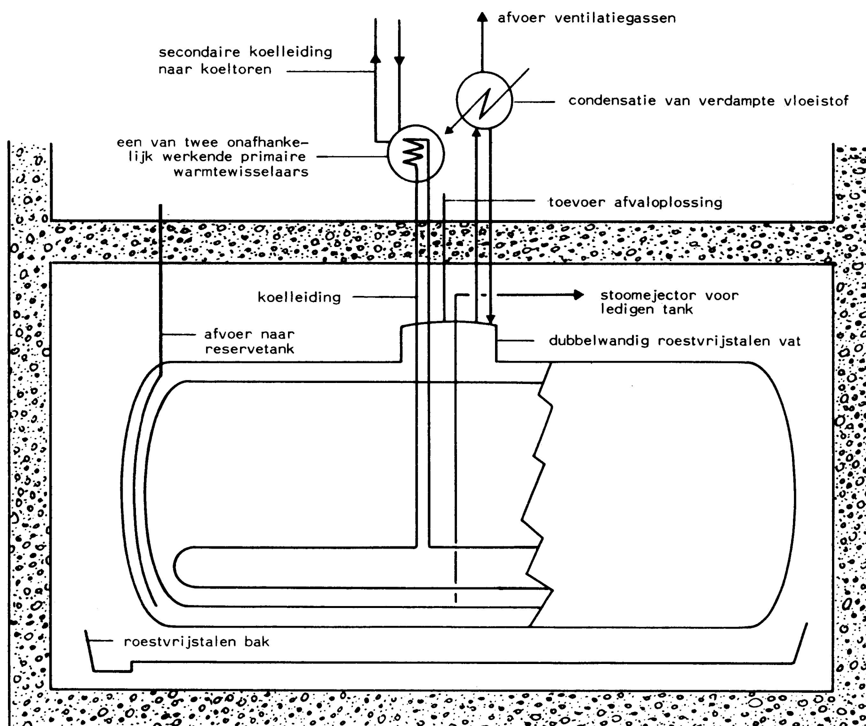
Figuur 3
Principeschema van het purexproces

werkt. Het purexproces blijkt zo veelzijdig en flexibel te zijn, dat er feitelijk weinig behoefte bestaat aan de ontwikkeling van andere processen. Dit wil echter niet zeggen dat zich geen moeilijkheden hebben voorgedaan bij de ontwikkeling van dit proces. Maar de technische mogelijkheden van de gekozen procedure zijn zonder twijfel groot.

Behandeling van hoog-radioactief afval

De conditionering van radioactief afval heeft tot doel de omvang ervan te reduceren en de radioactieve stoffen die het bevat onoplosbaar te maken in water en in mogelijke opslagmedia. De technieken voor het conditioneren bestaan. Zij zijn beproefd en worden al lang op industriële schaal toegepast voor laag- en middelactief afval.

Het volume van het vloeibare hoog-radioactieve en/of langlevende afval bedraagt jaarlijks ongeveer 50 m³ voor een centrale van 1.000 MW(e). Deze hoeveelheid bevat meer dan 99,9% van het totaal aan radioactieve afvalprodukten die gedurende het reactorbedrijf gevormd worden. Voordat het hoog-radioactieve afval wordt samengesmolten met vijf- tot tienmaal zijn gewicht aan borosilicaatglas, wordt de salpeterzure oplossing ingedampt, totdat een concentratie van 1.000 tot 3.000 Ci per liter bereikt is. Dit veroorzaakt een intensieve warmte-ontwikkeling in de oplossing, als gevolg van het vrijkomen van desintegratie-energie van de radionucliden. De oplossing wordt dan ook in roestvrijstalen tanks opgeslagen (zoals is afgebeeld in figuur 4) en voorzien van een aantal onafhankelijk werkende



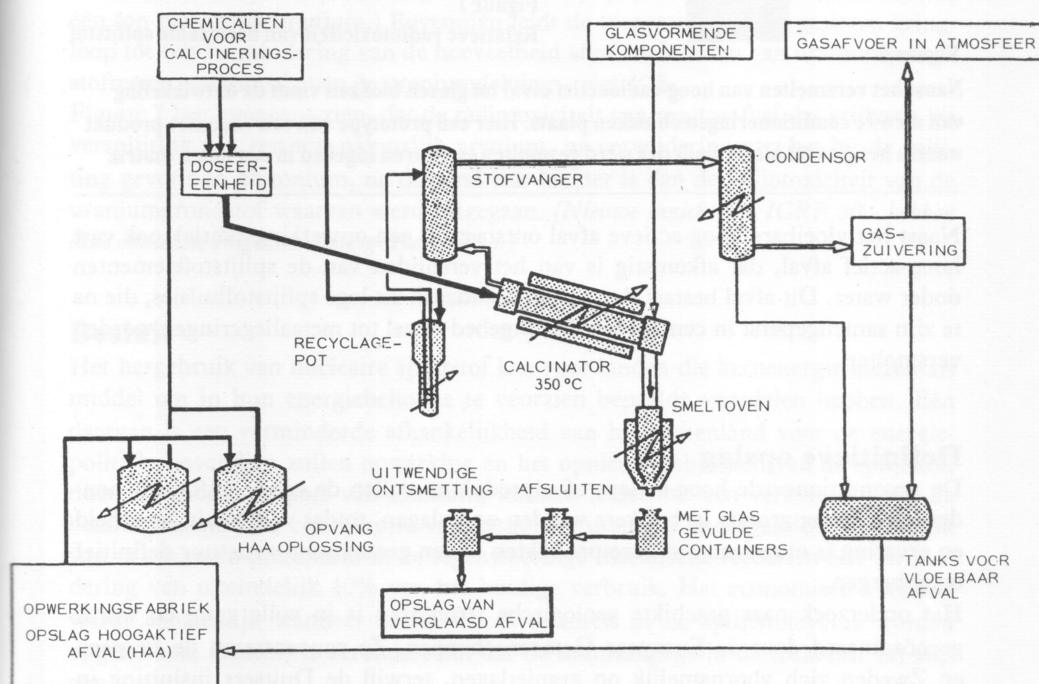
Figuur 4
Opslagtank voor hoog-actief afval bij Eurochemie, Mol (België)

koelsystemen, die ervoor moeten zorgen dat de temperatuur beneden 60°C blijft om corrosie van het containerstaal zo gering mogelijk te houden. De tanks zijn dubbelwandig uitgevoerd, teneinde bij een onverhoopte lekkage de inhoud alsnog zonder

risico naar een reservetank te kunnen overpompen. Bovendien wordt voortdurend lucht door de tanks gecirculeerd om te voorkomen dat de vaste deeltjes bezinken.

De ervaring heeft geleerd dat deze vorm van opslag veilig kan worden uitgevoerd, wanneer de essentiële veiligheidsmaatregelen worden getroffen en het principe van meervoudige barrières wordt toegepast. Bovendien gaat het hier altijd om een tijdelijke maatregel, in afwachting van de conditionering van het afval. Na een opslagtijd in vloeibare vorm van ongeveer drie tot vijf jaar, waarbij het activiteitsniveau zeker tienmaal kleiner is geworden door natuurlijk verval, wordt de vloeistof ingedampt en de vaste massa gebakken. Het gebakken materiaal wordt gemengd met glasvormende materialen en verhit tot ongeveer 1.200°C. Daarna wordt het in een roestvrijstalen cilinder gegoten, waarin het stolt tot een glasblok.

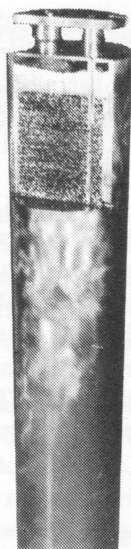
Van de verschillende processen die ontwikkeld zijn wordt het Franse AVM-proces op industriële schaal toegepast sinds 1978. In de periode juni 1978 tot mei 1981 werd in Marcoule 172 ton glas gegoten. Het AVM-proces is afgebeeld in figuur 5.



Figuur 5
Principeschema van de verglazingsinstallatie te Marcoule, volgens gegevens van het *Commissariat à l'Energie Atomique* (CEA)

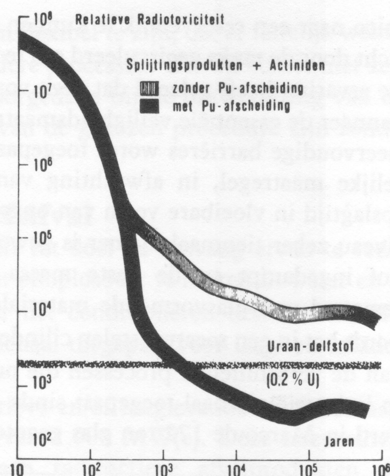
Een soortgelijke installatie zal in de loop van de komende vijf jaar in La Hague gebouwd worden om de behoefte van de opwerkingsfabriek aldaar te dekken. Men moet jaarlijks rekenen op 3 m³ verglaasd hoog-radioactief afval per lichtwaterreactor van 1.000 MW(e).

De conditionering van het hoog-radioactieve afval wordt nog steeds verder ontwikkeld. Zo is thans in Mol een door Duitsland gefinancierde proeffabriek in aanbouw, waarvan een aanzienlijk deel van 60 m³ vloeibaar hoog-radioactief afval, afkomstig van de opwerkingsfabriek Eurochemie, zal worden verwerkt tot glazen bolletjes. Deze zullen op hun beurt worden ingebed in een loodlegering. Het uiteindelijke afval, vitromet genaamd, wordt verpakt in roestvrijstralen containers waarvan een doorsnede is gegeven in figuur 6.



Figuur 6

Naast het versmelten van hoog-radioactief afval tot glazen blokken vindt de ontwikkeling van nieuwe conditioneringstechnieken plaats. Hier een prototype van een vitromet-produkt waarin het glas tot kleine bolletjes werd gesmolten en daarna ingebed in een loden matrix



Figuur 7

Relatieve radiotoxiciteit van bestraalde splijtstof

Naast het vloeibare hoog-actieve afval ontstaat bij een opwerkingsfabriek ook vast hoog-actief afval, dat afkomstig is van het versnijden van de splijtstofelementen onder water. Dit afval bestaat dan ook in hoofdzaak uit lege splijtstofhulsjes, die na te zijn samengeperst in cement worden ingebed ofwel tot metaallegeringen worden versmolten.

Definitieve opslag

De geconditioneerde hoog-actieve afvalprodukten zullen de eerste vijftig tot honderd jaar bovengronds in bunkers worden opgeslagen, totdat voldoende zekerheid en ervaring is opgedaan om deze produkten in een geologische structuur definitief op te bergen.
Het onderzoek naar geschikte geologische structuren is in volle gang en wordt gecoördineerd door de Europese Gemeenschappen. Zo concentreren de Fransen en Zweden zich voornamelijk op granietlagen, terwijl de Duitsers insluiting in steenzoutformaties overwegen. Italië en België bestuderen opslag in speciale kleilagen. Nederland speelt in deze onderzoekingen een bescheiden rol en bestudeert de opslag in Nederlandse steenzoutformaties. Ondergrondse opslag wordt uitgebreid besproken in hoofdstuk 18.

Milieu- en veiligheidsaspecten

Met betrekking tot de milieu-aspecten van opwerking en hergebruik van splijtstof dringen zich twee vragen op. Ten eerste: kan de opwerking zo worden uitgevoerd dat de door de wet toegelaten stralingsdosis voor werknemers en omgeving niet wordt overschreden? En ten tweede: wat zijn de milieutechnische voor- of nadelen van opwerking en hergebruik in vergelijking met die van de open cyclus, waarbij bestraalde splijtstof als afval wordt beschouwd?
De opwerking en het terugvoeren van gezuiverd uranium en plutonium naar de fabrikant van splijtstof kunnen veilig plaatsvinden binnen de normen die zijn gesteld door de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP). De

INFCE-studiegroep (2) heeft unaniem geconcludeerd dat de meeste opwerkingsactiviteiten in de verschillende landen ver binnen de gestelde veiligheidsgrenzen blijven.
Hergebruik van bestraalde splijtstof in een economie, waarin alle elektrische energie van nucleaire oorsprong zou zijn, zou het natuurlijke stralingsniveau, afkomstig van de ons omringende natuurlijke radionucliden en de kosmische straling met ten hoogste 0,1% doen toenemen. Deze verhoging blijft ver binnen de schommelingen van de natuurlijke achtergrondstraling die plaatselijk meer dan tweemaal zo hoog of zo laag kan zijn als normaal.
De vergelijking van de invloed op het milieu van een gesloten splijtstofcyclus met die van een open cyclus is moeilijk in kwantitatieve grootheden uit te drukken. De gesloten kringloop heeft twee voordelen. Ten eerste wordt het langlevende plutonium teruggevoerd en verspleten in kernreactoren, waardoor dit radiotoxische deel aan het afval wordt onttrokken. Dit blijkt uit figuur 7, die de relatieve radiotoxiciteit weergeeft van kernafval dat is geproduceerd in respectievelijk een open en een gesloten cyclus. (In beide gevallen is de splijtstof aan het begin van de cyclus één ton natuurlijk uranium.) Bovendien leidt de toepassing van de gesloten kringloop tot een vermindering van de hoeveelheid afval in de vorm van uraniumgrondstofresten – afkomstig van de uraniumdelving – met 40%.
Figuur 7 laat eveneens zien, dat de radiotoxiciteit van reactorafval dat vrijkomt bij versplijting van een ton natuurlijk uranium, na verwijdering van het bij de splijting gevormde plutonium, na duizend jaar kleiner is dan de radiotoxiciteit van de uraniumgrondstof waarvan werd uitgegaan. *(Nieuwe inzichten - ICRP 30 - hebben deze conclusie enigszins ondergraven. - Red.)*

Besluit

Het hergebruik van nucleaire splijtstof kan voor landen die kernenergie kiezen als middel om in hun energiebehoefte te voorzien bepaalde voordelen hebben. Eén daarvan is een verminderde afhankelijkheid van het buitenland voor de energiepolitiek; bovendien zullen opwerking en het opnieuw gebruiken van de splijtstof, door afnemende import van uranium, kunnen leiden tot een verbetering van de betalingsbalans. De consumptie van natuurlijk uranium ondergaat bij hergebruik van uranium en plutonium in de tegenwoordige thermische reactoren een vermindering van uiteindelijk 40% van het huidige verbruik. Het economisch voordeel wordt aanzienlijk wanneer snelle kweekreactoren in de splijtstofcyclus worden opgenomen. Daarbij is verondersteld dat de uraniumprijs in de toekomst zal stijgen.
Uit een oogpunt van het milieu is er geen doorslaggevend argument aan te voeren voor hetzij een open, hetzij een gesloten splijtstofcyclus. Hoewel men het er blijkbaar over eens is dat stabiele geologische lagen een betrouwbare opslagruimte vormen voor middel- en hoog-actief afval, moet toch nog verscheidene jaren intensief onderzoek worden gedaan om die betrouwbaarheid te kunnen bewijzen. De tussenliggende periode kan worden overbrugd door de voorlopige opslag van het geconditioneerde afval in bovengrondse gebouwen.

Referenties

(1) M. de Bacci et al., *Possible Future Roles for Fast Breeder Reactors,* Part I and II, Commission of the European Communities, Brussel, juli 1978.

(2) *Reprocessing, Plutonium Handling, Recycle,* Report of INFCE Working Group 4, International Atomic Energy Agency, Wenen 1980.

18. DE OPSLAG VAN RADIOACTIEF AFVAL

A.J. van Loon

De radioactiviteit van kernsplijtingsafval verdwijnt weliswaar in de loop van de tijd, maar het tempo waarin dat gebeurt is zeer laag. Dit betekent dat de insluiting gedurende vele eeuwen deugdelijk moet zijn, omdat pas ná die tijd een activiteitsniveau wordt bereikt dat even hoog is als (of lager is dan) dat van de natuurlijke achtergrond. Na een overzicht van een aantal mogelijkheden, die voorlopig als onpraktisch moeten worden gekarakteriseerd, gaat dit hoofdstuk in op insluitsystemen die gedurende eeuwen een hoge garantie op deugdelijkheid bieden. Daarvoor komen ondergrondse geologische formaties in aanmerking, waarvan bewezen is of nog bewezen kan worden dat ze goed zijn afgesloten van grondwater. In die formaties kan een aantal gaten worden geboord, maar bij voorkeur een mijn worden aangelegd voor de eindopslag van het verglaasde kernsplijtingsafval. Het onderzoek naar deze mogelijkheid is ver gevorderd maar heeft nog nergens geleid tot de realisatie. In afwachting van de eindopslag is om een aantal redenen tussenopslag in geconditioneerde gebouwen wenselijk. Dit hoofdstuk gaat ook in op de eindopslag van het overige, volumineuze maar weinig radioactieve, afval dat in de splijtstofcyclus ontstaat.

Radioactief afval is niet alleen een probleem van kerncentrales en andere fabrieken uit de splijtstofcyclus. Ook ziekenhuizen, laboratoria en onderzoeksinstellingen produceren dit type afval. Toch wordt een oplossing van het afvalprobleem vooral verwacht van de zijde van de kernenergie; niet geheel ten onrechte, want het gevaarlijkste afval wordt inderdaad in die sector geproduceerd. Deze vaststelling betekent overigens niet dat al het geproduceerde afval uit de splijtstofcyclus even gevaarlijk is. Integendeel, het risico wordt vooral bepaald door een procentueel gering aandeel van het afval, namelijk de gebruikte splijtstof of, na opwerking daarvan, het kernsplijtingsafval (KSA); dit bevat meer dan 99% van alle radioactiviteit.
Bijna al het afval wordt, voor zover nog noodzakelijk, door indamping of andere methoden omgezet in vaste stof. Door de uiteenlopende aard en samenstelling van dit vaste afval treden er grote verschillen op in de mate van radioactiviteit. Hoe dit afval moet worden verwerkt en opgeslagen is een probleem dat internationaal wordt onderzocht (1) en waaraan ook in Nederland uitgebreid aandacht wordt besteed (2).

Soorten afval

Op grond van de specifieke kenmerken, met name de aard van de straling en de mate van radioactiviteit, kan men een vijftal hoofdgroepen afval onderscheiden. Bij het (laag-actieve) alfa-afval overheerst uiteraard de alfa-straling; bij het uiterst hoog-actieve KSA overheerst de bèta-straling; en bij de drie overige typen is sprake van uiteenlopende stralingsactiviteit, maar van een ongeveer gelijkwaardige activiteit van de bèta- en gamma-straling.

LAVA

Laag-actief vast afval (LAVA) mag aan het oppervlak (of aan de buitenzijde van de

verpakking) een exposietempo (stralingsintensiteit) vertonen van niet meer dan 200 mrem per uur, wat inhoudt dat de specifieke activiteit niet hoger oploopt dan tot enkele millicuries (mCi) per m^3. Het grootste gedeelte van dit afval bestaat uit materialen die gebruikt zijn bij onderhouds- en reparatiewerkzaamheden, zoals besmette kleding, filters en schoonmaakmateriaal.
Ondanks het feit dat LAVA een relatief grote hoeveelheid afval vormt, gaat het in absolute zin om geringe hoeveelheden. In verpakte vorm gaat het bij Borssele en Dodewaard samen om ca. 100 m^3 per jaar. Daarbij moet men echter wel optellen wat er t.z.t. bij zal komen na ontmanteling van de centrales; omgerekend per bedrijfsjaar betekent dat zo'n 250 m^3 extra voor beide centrales samen.

MAVA

Middel-actief vast afval (MAVA) heeft aan het oppervlak van de verpakking een exposietempo van 200-2.000 mrem per uur, wat overeenkomt met een specifieke activiteit van enkele Ci per m^3. Het bestaat voornamelijk uit laboratoriumafval, concentraten van radioactieve vloeistoffen en filterslib. De hoeveelheden zijn vergelijkbaar met die van LAVA: voor Borssele en Dodewaard gaat het om ca. 100 m^3 per jaar. Daarbij moet men wel bedenken dat het, evenmin als bij LAVA, niet gaat om 'puur' radioactief afval, maar om betonblokken waarin een zeker gehalte aan radioactief materiaal zit opgesloten.
Om het stralingsrisico te beperken verdunt men het MAVA soms met zoveel beton, dat het voldoet aan de criteria van LAVA. In de praktijk blijkt het volume dan met ca. 300% toe te nemen. In dit verband is het echter ook nuttig erop te wijzen dat ontwikkelingen gaande zijn waarbij het LAVA wordt geconcentreerd tot MAVA. Doelstelling is daarbij om tot een geringer volume aan afval te komen (wat de transportkosten drukt); het exposietempo van MAVA wordt daarbij niet als problematisch ervaren.

HAVA

Hoog-actief vast afval (HAVA) heeft een exposietempo van minimaal 2.000 mrem (2 rem) per uur. De specifieke activiteit is hoog (tot ca. 110 Ci per m^3) en wordt vooral veroorzaakt door kobalt-60, caesium-134 en caesium-137. Een zeer degelijke, afschermende verpakking is daarom noodzakelijk voor dit afval, dat vooral gevormd wordt door harsen, filterslib en defecte onderdelen.
Borssele en Dodewaard samen leveren jaarlijks ca. 50 m^3 (verpakt) HAVA. Hierbij moet men echter eigenlijk weer iets optellen, namelijk wat er na ontmanteling van de centrales vrijkomt (met name het reactorvat); omgerekend per bedrijfsjaar betekent de ontmanteling 50 m^3 extra (verpakt) HAVA voor de twee centrales samen.

Alfa-afval

Een bijzondere vorm van afval wordt geproduceerd bij de fabricage van splijtstofelementen en tijdens de opwerking. In dit afval komen transuranen voor (met name plutonium, americium en curium), zij het in zo geringe concentratie (minder dan een half procent) dat er sprake is van laag-actief afval.
Er is bij dit afval een langdurige alfa-straling, afkomstig van vooral laboratoriummaterialen zoals glas, keramiek, plastics en filtermateriaal. Van meer belang is echter de aanwezigheid van het plutonium, waarvan de sterk giftige eigenschappen zeer strenge veiligheidseisen vergen.

KSA

Kernsplijtingsafval (KSA) is verreweg het meest problematische afvalprodukt. Het bestaat uit de restanten van de gebruikte splijtstof, nadat daaruit bij de opwerking de nog bruikbare bestanddelen (uranium en plutonium) zoveel mogelijk zijn ver-

wijderd; technisch gezien is een volledige verwijdering onmogelijk, zodat van deze twee elementen ca. 0,2% in het KSA achterblijft.
Het KSA bevat meer dan 99% van alle radioactiviteit, zodat uitzonderlijke maatregelen nodig zijn bij transport en opslag. Zelfs ingegoten in glas of keramisch materiaal en vervolgens verpakt in roestvrij-stalen cylinders ligt de specifieke activiteit aanvankelijk in de orde van grootte van 1 MCi per m^3.
De hoeveelheden KSA zijn uitermate gering. Dat hangt uiteraard samen met de geringe hoeveelheid splijtstof die een kernenergiecentrale nodig heeft: een 1.000 MW(e)-centrale heeft genoeg aan ca. 3 kg per dag (ter vergelijking: een kolencentrale met gelijke capaciteit gebruikt dagelijks ruim 5 miljoen kilogram steenkool). Het gevolg is dat Borssele en Dodewaard samen jaarlijks niet veel meer dan 500 kg KSA opleveren, wat neerkomt op slechts 2 tot 3 m^3 verpakt afval.

Het afvalprobleem

Langzamerhand is in onze samenleving het besef doorgedrongen dat het geproduceerde afval een ernstig probleem vormt. Dat geldt niet alleen voor het radioactieve afval, maar daarbij vormt de aard wel een geheel apart probleem. Er zijn in de loop der tijd echter diverse voorstellen gedaan (waarvan er ook sommige zijn gerealiseerd) om dit afval veilig op te bergen of op andere wijze onschadelijk te maken.
Men dient hierbij overigens wel onderscheid te maken tussen de diverse soorten afval die hierboven zijn genoemd; niet alleen vanwege de verschillende mate van radioactiviteit, maar ook vanwege verschillen in het verloop daarvan.

Bestraling van KSA

Er is wel gesuggereerd om het gevaarlijkste afval, het KSA, te bewaren totdat er fusiereactoren zijn ontwikkeld. Het zou dan namelijk mogelijk worden om in die reactoren het KSA te bestralen, waardoor de langlevende radioactieve isotopen worden omgezet in kortlevende. Daarmee zou een van de belangrijkste problemen zijn opgelost, namelijk de noodzaak van relatief langdurige opslag.
Omdat het KSA op deze wijze definitief onschadelijk zou worden gemaakt, lijkt deze mogelijkheid veelbelovend. Maar voorlopig is er slechts sprake van een theorie; fusiereactoren zullen bovendien nog lang op zich laten wachten, terwijl de hoeveelheid KSA blijft groeien. Bovendien wordt hiermee slechts een deel van het probleem opgelost, want de andere soorten radioactief afval kunnen niet op deze wijze vernietigd worden.

Wegschieten

Wanneer het wachten op fusiereactoren onverantwoord wordt geacht, zou men kunnen overwegen om het afval van de aarde te verwijderen met behulp van ruimtevaarttechnieken. Daarbij zijn diverse mogelijkheden realiseerbaar.
Ten eerste kan men het materiaal, bijvoorbeeld met een *space shuttle*, in een parkeerbaan om de aarde brengen. Dat is de goedkoopste methode, maar ook de gevaarlijkste. Na verloop van tijd zal het afval immers in de dampkring terugkeren en daar verbranden. Weliswaar zal dat lang duren (wellicht lang genoeg om de radioactiviteit tot een aanvaardbaar laag niveau terug te brengen), maar de veiligheidsmarges lijken hierbij onvoldoende groot. Bovendien is het bij een terugkeer in de dampkring niet uitgesloten dat gedeelten van het afval onvoldoende verbranden en op aarde terugvallen.
Het is dus veiliger om het afval weg te schieten tot buiten de invloedssfeer van de aarde. Daarbij kan men denken aan het wegschieten van het afval in het wereldruim; de kans dat het dan ooit op een hemellichaam terecht zal komen is verwaarloosbaar klein, de kans dat dat een planeet met levende organismen zal zijn is nog

kleiner en de kans dat zoiets gebeurt terwijl het afval bovendien nog gevaarlijk is, lijkt helemaal onmogelijk.

Een derde mogelijkheid is het afval naar de zon te schieten. Bij de daar heersende extreem hoge temperatuur (5.500°C aan de buitenzijde) zal het afval vernietigd worden. De prijs hiervan zou (bij wegschieten van het KSA) neerkomen op ongeveer één cent per opgewekt kilowattuur (kWh).

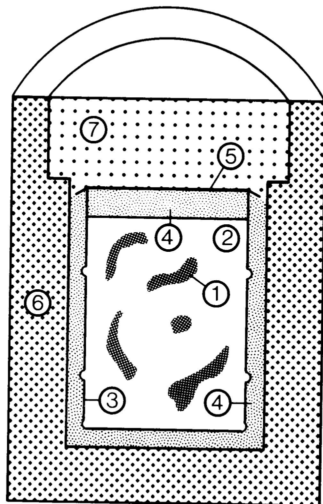
De vierde mogelijkheid is nog interessanter: men zou het KSA met *space shuttles* in een baan rondom de zon kunnen brengen. Dit zou goedkoper zijn: ca. 0,5 cent per kWh. Toch zijn ook aan deze oplossing bezwaren verbonden, o.a. dat het alleen gaat om het KSA, zodat het probleem voor het andere afval blijft bestaan. En als men er van uitgaat dat omstreeks 2,5% van de wereldenergievoorziening door kernenergie zal worden gedekt, dan betekent dat nog altijd 1.000 ton verglaasd KSA per jaar, zodat er elke dag een *space shuttle* voor dit doel zou moeten worden gelanceerd.

Tenslotte geldt dat bij de huidige technieken de lanceringen zelf een groter risico inhouden dan het opslaan van het afval op aarde zelf. Bovendien is ook hier sprake van toekomstmuziek: het project zou niet voor 1995 van start kunnen gaan, zodat zich nog geruime tijd toch KSA op aarde zou ophopen.

Dumpen op zee

LAVA (en gewoonlijk ook MAVA) danken hun radioactiviteit aan isotopen met een korte halveringstijd (ongeveer 10 jaar). Dat betekent dat na 100 jaar reeds 99,9% van de – toch al lage – stralingsintensiteit is verdwenen. Bij opslag van dit afval ontstaat er dus geen voortgaande accumulatie, maar zal na verloop van tijd een dynamisch evenwicht worden bereikt. Daarom is het mogelijk om LAVA zonder gevaar of schade voor de biosfeer op zee te dumpen.

In Nederland wordt het daarvoor in aanmerking komende afval door het ECN verzameld bij alle instanties die LAVA produceren. Vervolgens wordt dit afval, dat al in iets samengeperste vorm in vaten van honderd liter bij het ECN aankomt, opnieuw samengeperst. De honderdliter-vaten worden zo omgevormd tot platte schijven die in beton worden ingebed en vervolgens weer verzameld in vaten van tweehonderd liter. Bij stoffen waarbij deze procedure niet kan worden gevolgd (bijvoorbeeld bij ionenwisselaars en slurries van filters) plaatst men het tweehonderdliter-vat nog eens in een betonblik met wanden van 25 cm dik en een volume van 1 m^3 (figuur 1). Deze zogenaamde B-containers kunnen dan weer wel veilig gedumpt worden. Dat dumpen gebeurt eenmaal per jaar vanaf een speciaal voor dat doel uit-

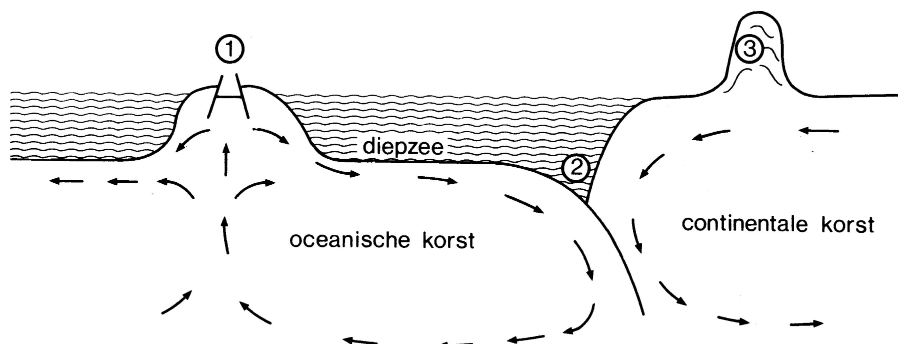


Figuur 1
Doorsnede door een B-container met laag-actief afval. Het eigenlijke afval (1) zit ingegoten in beton (2) dat de opvulling vormt van een stalen tweehonderdliter-vat (3). Dit vat is gevuld met een soort dun vloeibaar beton (4), voordat het deksel (5) erop werd vastgezet. Het tweehonderdliter-vat zelf vormt de opvulling van een duizendliter-blok van gewapend beton (6); de ruimte tussen deze twee vaten is weer met dun vloeibaar beton (4) opgevuld. Het duizendliter-vat wordt afgesloten door een gewapend betonnen deksel (7), dat als het ware aan de rest van het vat wordt vastgeschroefd.

gerust schip. Het LAVA wordt gestort in de Atlantische Oceaan, op een punt tussen Engeland en Spanje waar de zeebodem ruim 4 km diep is.
Het dumpen op zee biedt echter ook slechts een beperkte oplossing, omdat andere soorten dan LAVA niet zonder risico's op deze wijze behandeld kunnen worden. Bij het HAVA, en zeker bij het KSA, komen namelijk elementen voor met een zo hoge halveringstijd dat er wel degelijk een accumulatie van radioactiviteit zou kunnen gaan optreden. Dat betekent dat de biosfeer zou kunnen worden aangetast, ook al kan men in principe stortplaatsen zoeken waar het gedumpte afval door snelle sedimentatie al spoedig bedekt is met een sedimentlaag.
Zeker van de diepzee is de ecologie nog zo fragmentarisch bekend, dat het onverantwoord lijkt om daar afval te storten met giftige bestanddelen zoals plutonium en een hoog stralingsniveau.

Subductiezones

De aardkorst vormt geen star geheel, maar vormt samen met het bovenste deel van de aardmantel een aantal schollen die ten opzichte van elkaar bewegen. Dit mechanisme wordt veroorzaakt door langzame convectiestromen in het binnenste der aarde en heeft onder meer tot gevolg dat de continenten langzaam ten opzichte van elkaar verschuiven.



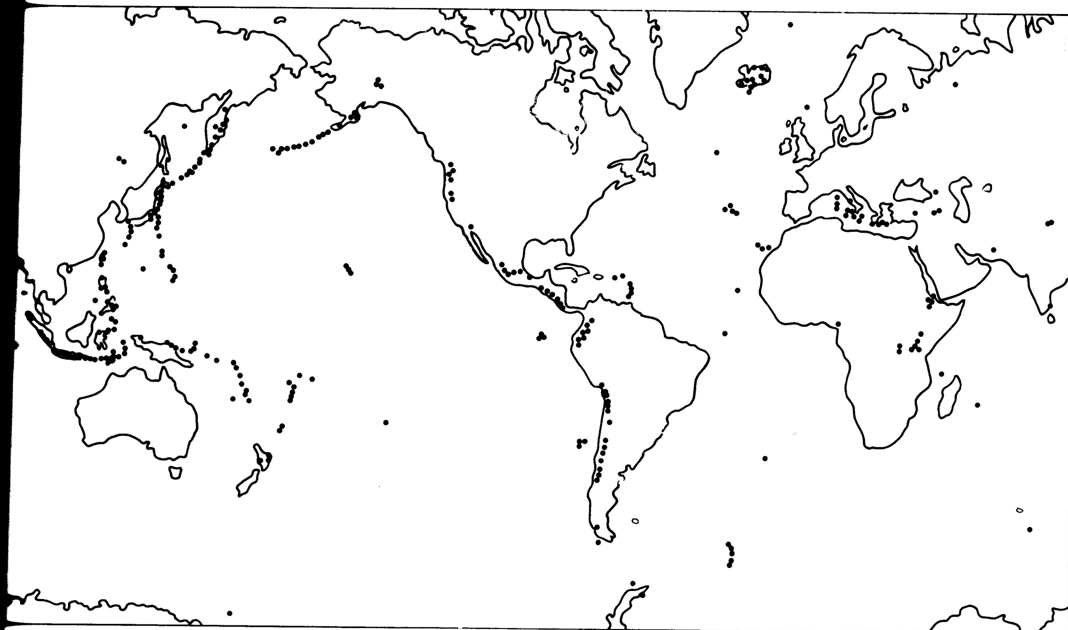
Figuur 2
Schematisch beeld van convectiestromen (tot 500-600 km diep) in de aardkorst en bovenste aardmantel. Gesteente wordt opgestuwd in o.a. midoceanische ruggen (1) en verdwijnt in de subductiezones (2), waar twee schollen tegen elkaar opbotsen en plooiingsgebergten (3) ontstaan.

Waar twee schollen tegen elkaar opbotsen, schuift de ene onder de andere weg in zogenaamde subductiezones (figuur 2). Dat gebeurt op tal van plaatsen, vaak op de grens van een continent en een oceaan. Onder andere rondom de Stille Oceaan treedt dit proces duidelijk op; het uit zich niet alleen in het veelvuldig optreden van aardbevingen (San Andreasbreuk) en vulkanisme (Japan), maar ook in het optreden van diepzeetroggen. Die zijn een gevolg van de 'sleuring' die optreedt waar de ene schol onder de andere verdwijnt.
Er zijn voorstellen gedaan om het radioactieve afval te dumpen in dergelijke subductiezones, omdat het dan na verloop van tijd vanzelf zou worden meegevoerd tot diep in de aarde waar het zou smelten en zich vermengen met het overige magma. Zou het later, bijvoorbeeld bij een vulkanische uitbarsting, weer aan het aardop-

pervlak terechtkomen, dan zou het zo sterk 'verdund' zijn dat het zelfs niet meer gemeten zou kunnen worden; het afval zou dan dus minder bijdragen aan onze stralingsbelasting dan bijvoorbeeld een gewone kleibodem.
Tegen deze methode van dumpen bestaat echter een principieel bezwaar: het subductieproces vindt zo langzaam plaats dat er in principe geen verschil bestaat tussen dumpen in de diepzee en dumpen in een subductiezone. Dat betekent dus dat er rekening moet worden gehouden met aantasting van de ecosfeer wanneer men alle soorten radioactief afval in deze zones zou dumpen.

Lava-meren

Het idee om het radioactieve afval terug te voeren naar het binnenste der aarde, is echter toch te verwezenlijken, namelijk door storting in lava-meren. In sommige vulkanen vindt men binnen de kraterpijp namelijk een voortdurend 'borrelende' plas van lava, dat in directe verbinding staat met het magma in veel diepere zones. Convectiestromen, zoals die ook optreden in een ketel met kokend water, zorgen voor een voortdurende vermenging. Gezien de zeer grote hoeveelheid lava die hierbij betrokken is, zou er zeer veel afval in de lava-meren gestort kunnen worden zonder dat een merkbare verhoging van de stralingsintensiteit zou optreden. Ook wanneer het tot een uitbarsting zou komen, waarbij lava uit de vulkaan wegvloeit, zouden dus geen problemen optreden. Het eventueel meegevoerde afval zou bovendien vrijwel homogeen verdeeld in het uitvloeiingsgesteente zitten opgesloten, afgescheiden van de biosfeer.
In principe lijkt deze mogelijkheid dus zeer acceptabel. Het is echter de vraag of er voldoende lava-meren beschikbaar zullen zijn als men al het radioactieve afval in de komende decennia op deze wijze wil opruimen. Ook zal men bij het dumpen rekening moeten houden met een plotselinge uitbarsting, waarbij in zeer korte tijd personeel en materiaal op veilige afstand moeten worden gebracht.



Figuur 3
Verspreiding van de actieve vulkanen op aarde.

Een veel groter probleem wordt echter gevormd door de politieke en maatschappelijke consequenties. Niet alleen omdat er een kartel zou kunnen ontstaan van landen met lava-meren (figuur 3), maar vooral omdat het onwaarschijnlijk is dat de

autoriteiten en bevolking van geschikte gebieden hun toestemming zullen geven voor deze manier van opslag, waarbij het vrijwel zeker is dat er ooit een deel van het afval weer naar buiten zal komen met een lavastroom. Het feit dat er dan, objectief gezien, geen sprake is van een reëel radioactief gevaar, lijkt bij de besluitvorming op dit punt momenteel geen rol van betekenis te spelen.

Opslag in bunkers

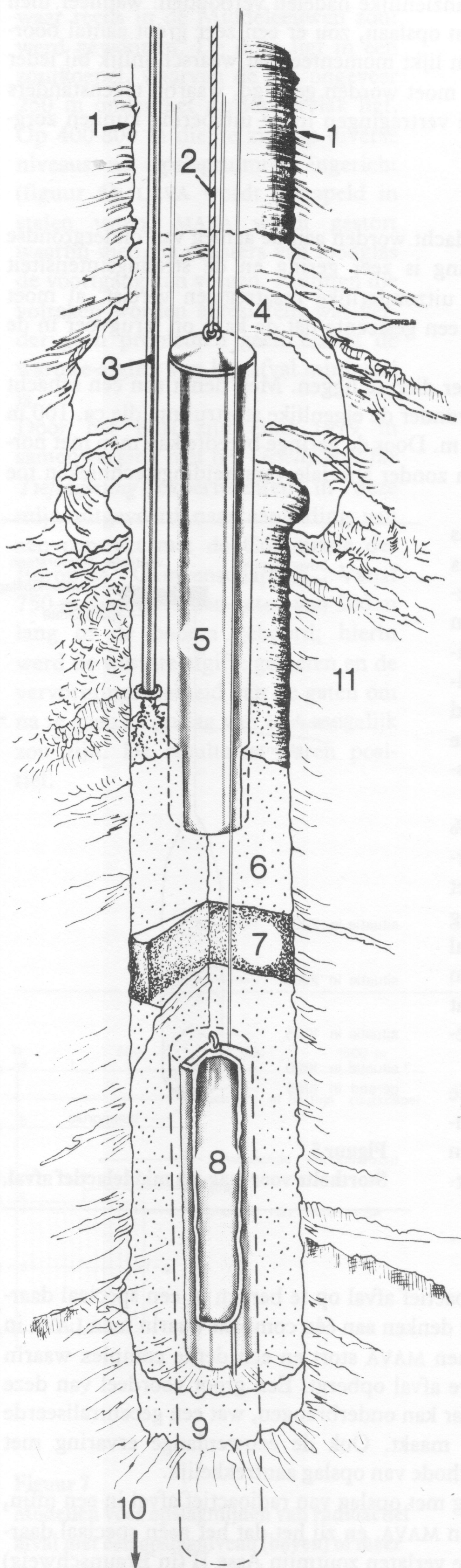
Een uiterst simpele mogelijkheid is om het afval in daartoe speciaal uitgeruste bunkers op te slaan. Die bunkers kunnen zowel bovengronds als onder het aardoppervlak worden aangelegd. Het gaat echter om een aanzienlijk volume; als 2,5% van de wereldenergiebehoefte wordt gedekt door kernenergie, ontstaat er jaarlijks ca. 250.000 m^3 afval (van LAVA tot KSA). De totale opslagruimte moet echter groter zijn, juist omdat bij HAVA en KSA de warmte-afgifte een belangrijke rol speelt. Bij de opslag van niet-opgewerkte splijtstofelementen moet men bovendien voorkomen dat er een kritische massa kan ontstaan waarin bij aanwezigheid van een moderator een kettingreactie op gang zou kunnen komen.
Indien men jaarlijks behoefte zou hebben aan 500.000 m^3 opslagruimte is dat nog steeds niet veel in absolute zin (vijf kolencentrales van 1.000 MW(e) leveren ook al 500.000 m^3 vliegas per jaar), maar er zijn wel speciale voorzieningen vereist. Er zal bijvoorbeeld bewaking moeten plaatsvinden om te voorkomen dat terroristische groeperingen zich meester maken van het afval om dat als dreigement te kunnen gebruiken. Ook zal men de opslagplaatsen zodanig moeten kiezen dat er geen gevaar voor de omgeving optreedt bij een natuurramp, een ongeluk of een sabotage-actie.
Op langere termijn lijkt deze oplossing daarom weinig mogelijkheden te bieden.

Ondergrondse opslag

Geen enkele oplossing lijkt zo veilig, zo goed uitvoerbaar en zo goedkoop als ondergrondse opslag. Daarbij wordt een belangrijke rol gespeeld door de overweging dat de grond zelf de straling absorbeert. Het is dan ook mogelijk om het afval zo diep weg te bergen, dat er geen effect meer optreedt aan het aardoppervlak. Daarnaast wil men echter de zekerheid hebben dat het afval niet door een ramp (bijvoorbeeld een aardbeving) of een normaal proces (bijvoorbeeld stroming van het grondwater) in de biosfeer terugkeert.
Er zijn diverse vormen van ondergrondse opslag gesuggereerd, waarvan de belangrijkste zijn: opslag in diepe boorgaten, opslag in stortruimten en opslag in speciaal daartoe aangelegde mijnen.

Boorgaten

Vooral oliemaatschappijen hebben een grote *know-how* op het gebied van diepboringen. Van die kennis kan men zeker gebruik maken. Een uitgewerkt voorstel in die richting is gedaan door T. Ringwood van de *Research School of Earth Sciences* (Universiteit van Canberra).
Ringwoods voorstel is om boorgaten te maken met een doorsnede van ongeveer 1,5 m en een diepte van 4 km. De onderste 2 tot 3 km zouden benut kunnen worden voor de opslag van afval, terwijl de bovenste 1 à 2 km zouden moeten dienen als buffer tussen dat afval en de biosfeer die tot hooguit enkele tientallen meters in de aardkorst doordringt. Deze dikke bufferzone zou o.a. moeten voorkomen dat het afval in contact komt met water dat naar het aardoppervlak kan terugkeren.
Het afval zelf moet worden ingegoten in synroc, een soort synthetisch gesteente dat juist voor dit doel in Canberra is ontwikkeld. De capsules hiervan zouden ongeveer drie meter lang moeten zijn maar betrekkelijk smal: ongeveer een halve meter. Dat



Figuur 4
Perspectiefdoorsnede van de diepboormethode voor het opslaan van radioactief afval
1 **boorgat in vaste rotsformaties, diepte ± 4 km, doorsnede ± 1,5 m;** ***2*** **hijskabel van containers met radioactief afval;** ***3*** **buis voor aanvoer van magnesiumoxyde;** ***4*** **geleide- en registratiekabels;** ***5*** **roestvrijstalen houder, lengte 3 m, doorsnede 50 cm;** ***6*** **magnesiumoxyde-aanvulling vormt door inbreng van water permanent ondoordringbare laag;** ***7*** **kleilaag tussen de containers, bovenste 1500 m van het boorgat eveneens met klei afgesloten;** ***8*** **radioactief afval in synroc (kunstmatige rots), een kunstmatig materiaal dat bestand is tegen langdurige blootstelling aan hoge temperatuur en druk;** ***9*** **volumevergroting van magnesiumoxyde na contact met grondwater sluit hermetisch af;** ***10*** **boorgat tot maximaal 4 km diepte;** ***11*** **zoveel mogelijk gelijkvormige rotsformatie in gebieden met zo laag mogelijk aardbevingsrisico.**

biedt de mogelijkheid om de ruimte tussen de capsule en de wand van het boorgat te vullen met een stof die sterk opzwelt bij vochtopname; dieptewater krijgt dan geen kans om het opslagsysteem te beschadigen. De capsules zelf zouden afzonderlijk in roestvrij-stalen vaten moeten worden geplaatst die onderling gescheiden moeten worden door (impermeabele) kleipakketten.
In zo'n boorgat (figuur 4) kan men het hoog-actieve afval opbergen dat alle 75 Amerikaanse centrales gedurende een jaar produceren. Dat betekent dat wanneer de Verenigde Staten nog honderd jaar zouden doorgaan met kernenergie en daarbij gemiddeld een driemaal zo grote capaciteit zouden hebben als thans (in 1981: 11,6% van het elektriciteitsgebruik), er 300 van dergelijke boorgaten nodig zouden zijn. Alle noodzakelijke technieken zijn bovendien bekend en de prijs is laag: per opgewekt kWh 0,1 tot 0,2 cent.

Aan deze methode zijn echter ook aanzienlijke nadelen verbonden: wanneer men al het radioactieve afval zo zou willen opslaan, zou er een zeer groot aantal boorgaten nodig zijn. Een ander probleem lijkt momenteel dat waarschijnlijk bij ieder boorgat opnieuw een hele procedure moet worden gevolgd, waarbij tegenstanders via beroepsmogelijkheden voor grote vertragingen in de uitvoering kunnen zorgdragen.

Stortruimten

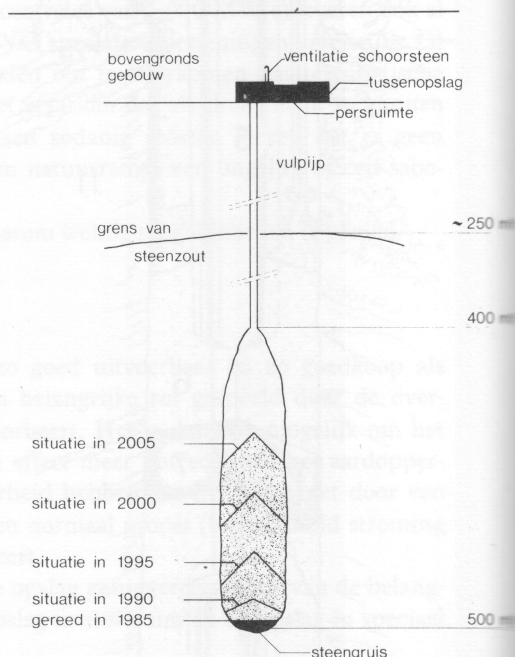
Met name bij LAVA en MAVA kan gedacht worden aan de aanleg van ondergrondse stortruimten. De warmte-ontwikkeling is zeer gering en de stralingsintensiteit neemt snel af. Daardoor zijn geen uitzonderlijke maatregelen vereist, al moet natuurlijk wel gekozen worden voor een gesteente dat de kans op terugvoer in de biosfeer in feite uitsluit.

De stortruimte behoefte niet bijzonder diep te liggen. Men denkt aan een schacht van omstreeks 400 m lengte met daaronder de eigenlijke stortruimte die ca. 100 m diep is, met een doorsnede van 20-25 m. Door de geringe breedte kan men met normaal storten de hele ruimte opvullen zonder speciale verspreidingstechnieken toe te passen (figuur 5).

De inhoud van de geschetste holte is 25.000-50.000 m^3, wat voldoende is voor vijfentwintig tot vijftig jaar bedrijf (inclusief ontmanteling) van een 1.000 MW(e)-centrale. Voor de huidige Nederlandse situatie zou dit voldoende zijn voor vijftig tot honderd jaar, dus aanzienlijk langer dan de veronderstelde levensduur van Borssele en Dodewaard.

Omdat na honderd jaar al ca. 99,9% van de stralingsintensiteit zal zijn verdwenen, is langdurige bewaking niet noodzakelijk en de kans op voortijdig ontsnappen van radioactief materiaal verwaarloosbaar klein. Ook de kosten zouden zeer gering zijn: men schat die op minder dan 0,1 cent per geleverde kWh.

Nadeel is weer dat deze methode alleen kan worden toegepast in combinatie met een andere voor HAVA en KSA. De warmte-afgifte van deze laatste maakt storten onmogelijk.



Figuur 5
Stortholte voor laag- en middelactief afval.

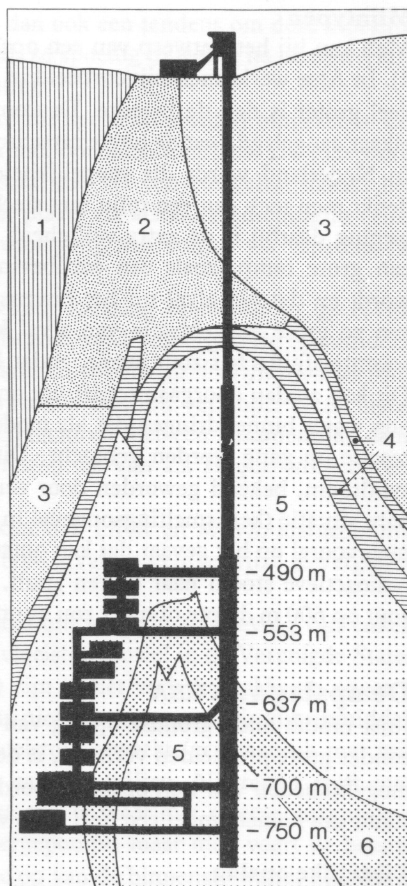
Opslagmijnen

Het is mogelijk om alle soorten radioactief afval op te bergen in een speciaal daartoe aangelegde mijn; men kan daarbij denken aan één complex waarin men LAVA in vaten opstapelt, een ander waarin men MAVA stort en een derde complex waarin men zorgvuldig geïsoleerd het andere afval opbergt. Een groot voordeel van deze methode is dat men alle afval bij elkaar kan onderbrengen, wat een gecentraliseerde en gecontroleerde aanpak mogelijk maakt. Ook de eeuwenlange ervaring met ondergrondse mijnen maakt deze methode van opslag aantrekkelijk.

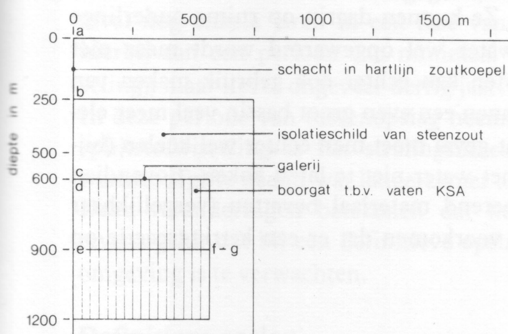
Er bestaat ook daadwerkelijk ervaring met opslag van radioactief afval in een mijn, zij het dat het alleen gaat om LAVA en MAVA, en zij het dat het geen speciaal daartoe aangelegde mijn is. Het betreft de verlaten zoutmijn Asse II (in Braunschweig)

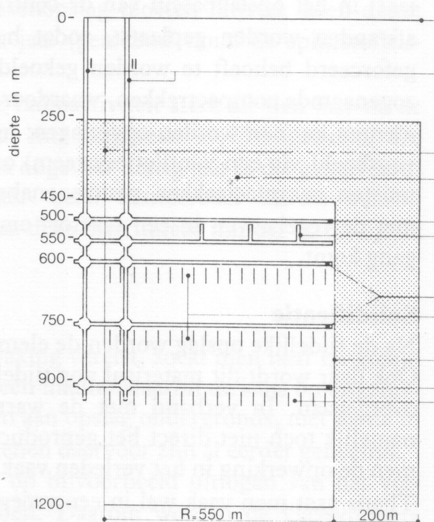
waar reeds in de Middeleeuwen zout werd gewonnen. De mijn ligt in een zoutkoepel, waarvan de top ongeveer 250 m onder het aardoppervlak ligt. Op 400-800 m diepte zijn op diverse niveaus nu opslagruimten ingericht (figuur 6); LAVA wordt gestapeld in stalen vaten, MAVA wordt gestort waarbij men via vensters van loodglas de voortgang kan volgen. Ruimten die volraken worden afgesloten, wat verder geen problemen geeft omdat de warmte-afgifte van het afval minimaal is.

Door het ECN zijn eind 1979 in samenwerking met het *Gesellschaft für Tieflagerung* experimenten in deze mijn uitgevoerd naar aanleiding van een contract met de Commissie der Europese Gemeenschappen. Vanaf 750 m diepte werden gaten van 300 m lang in de bodem geboord; hierin werd de warmte-afgifte gemeten en de vervormingssnelheid van de gaten om na te gaan of opslag van KSA mogelijk zou zijn. De resultaten waren positief.



Figuur 6
Schematische doorsnede door de zoutmijn Asse II, in gebruik als opslagplaats voor LAVA en MAVA.





Figuur 7
Modellen voor opslagmijnen van radioactief afval met één opslagniveau (boven) of meer opslagniveaus (onder).

Mijntypen

Men kan bij het ontwerp van een opslagmijn uitgaan van verschillende ideeën (3, 4). In Asse werkt men bijvoorbeeld in een vrij spitse zoutkoepel, waarbij de hoogte veel groter is dan de breedte. Daarom heeft men een aantal opslagniveaus boven elkaar aangelegd, wat de totale capaciteit uiteraard sterk vergroot.

In Nederland wordt die mogelijkheid niet uitgesloten, maar in eerste instantie denkt men toch aan een mijn met slechts één niveau (figuur 7). Voornaamste overweging daarbij is de extra veiligheid. Men kan zich immers voorstellen dat door een grote ramp, zoals een aardbeving, het zout tussen twee niveaus verstoord wordt en dat het afval uit het bovenste niveau omlaag zou zakken. Dat zou daar een zo grote concentratie van afval kunnen opleveren, dat door de toegenomen warmte-afgifte het zout smelt, zodat het afval nog een niveau lager terechtkomt. Dit kan zo dan doorgaan totdat het onderste niveau bereikt is. Zou dan bovendien nog water binnendringen dat als moderator dienst kan doen, dan kan een kettingreactie op gang worden gebracht. Dit is de essentie van het zogenaamde China-syndroom, bekend geworden door een film over dit onderwerp bij een vergelijkbare situatie (kernsmeltingsongeval in een centrale). Bij het China-syndroom wijst men vooral op het gevaar dat kan ontstaan wanneer grondwater wordt verhit en als radioactieve stoom naar buiten spuit. Welke negatieve effecten het wegzinken in zout op 600 m diepte of meer zou kunnen hebben, is nog onduidelijk.

De opslag van KSA

Juist omdat ondergrondse opslag van LAVA en MAVA al in de praktijk bestaat en zonder grote problemen verloopt, is de aandacht momenteel vooral gevestigd op de mogelijkheden van KSA-opslag. Voordat er een definitieve opslag van dit afval tot stand kan komen, moet een heel scala van bewerkingen zijn uitgevoerd.

Tijdelijke opslag

Van de splijtingsprodukten is ongeveer 10% radioactief. Die 10% zorgt voor een aanzienlijke warmteproduktie, waardoor de verspleten splijtstof niet direct kan worden opgewerkt. Omdat het aannemelijk is dat in de toekomst opwerking een algemeen toegepast proces zal zijn in de splijtstofcyclus, zal verder voorbij gegaan worden aan de directe opslag, dat is de opslag van niet-opgewerkte splijtstofstaven. Voor de definitieve opslag vragen die echter een vergelijkbare behandeling als KSA.

Na de splijtstofwisseling blijven de elementen geruime tijd (meestal ongeveer een jaar) in het opslagbassin van de centrale. Ze kunnen daarin op ruime onderlinge afstanden worden geplaatst, zodat het water wel opgewarmd wordt maar niet geforceerd behoeft te worden gekoeld. Men kan echter ook gebruik maken van zogenaamde compactrekken, waardoor binnen een even groot bassin veel meer elementen kunnen worden opgeslagen; in dat geval moet men echter wel koelen (bijvoorbeeld via een ventilatiesysteem) om het water niet te laten koken. Bovendien moeten comptactrekken neutronenabsorberend materiaal bevatten (vergelijkbaar met de regelstaven in een reactor) om te voorkomen dat er een kettingreactie op gang komt.

Solidificatie

Na de tijdelijke opslag worden de elementen vervoerd naar een opwerkingsfabriek. Ook daar wordt dit materiaal nog tijdelijk opgeslagen voordat tot opwerking wordt overgegaan. In verband met de warmte-afgifte en stralingsintensiteit kan men namelijk toch niet direct het geproduceerde KSA verwerken. Om deze reden heeft men de opwerking in het verleden vaak vele jaren uitgesteld.

Thans gaat men vaak wel in een vroegtijdig stadium over tot opwerking, zodat de teruggewonnen splijtstof weer ter beschikking komt zonder veel tijds- en renteverlies. Men zit dan echter wel met een hoog-actieve, hete vloeistof met KSA; uiteraard

brengt dit risico's met zich mee. Er bestaat dan ook een tendens om deze vloeistof, die in opslagtanks wordt bewaard en gekoeld, zo spoedig mogelijk na de opwerking om te zetten in een vaste vloeistof (solidificatie).

Bij de opwerkingsfabriek in Cap La Hague zal het afval worden omgezet in een calcinaat dat daarna wordt samengesmolten met boriumsilicaatglas. Dit glas wordt ingegoten in cylinders van chroom-nikkelstaal die via een vastgelast deksel hermetisch worden afgesloten. Dit proces vindt plaats via afstandsbediening in cellen met dikke betonwanden, waarbij men de voortgang kan volgen via vensters van loodglas.

In Marcoule (Frankrijk) heeft men een zekere ervaring opgedaan in de PIVER-installatie, waarin een niet-continue solidificatie werd verzorgd. Er is inmiddels echter ook een grotere installatie gereedgekomen (*Atelier de Vitrification de Marcoule*, AVM), waar het verglazingsproces praktisch continu verloopt. Deze installatie kan het afval verwerken van lichtwaterreactoren met een gezamenlijke capaciteit van 10.000 MW(e). Bij de opwerkingsfabriek van La Hague wil men een soortgelijke installatie bouwen.

Tijdens de opwerking ontstaat naast het KSA ook LAVA en MAVA, alsmede alfa-afval. Men is thans geneigd om dit laatste type afval op gelijke wijze te verglazen als het KSA.

De solidificatie in een betrekkelijk vroeg stadium is mede een gevolg van enkele slechte ervaringen bij de opslag van KSA in vloeistof. Zowel in de Verenigde Staten (o.a. Hanford) als in Engeland (Windscale) zijn in het verleden lekkages opgetreden. Nadelige gevolgen heeft men overigens niet geconstateerd. Er zijn inmiddels honderden miljoenen liters hoog-actieve vloeistof verwerkt (gezamenlijk met miljarden curies), zonder aantoonbare schade aan het milieu. Niettemin treft men thans extra voorzorgsmaatregelen: men volstaat niet meer met reservetanks waarin de vloeistof bij een lekkage kan worden overgepompt, maar men voert de bassins ook dubbelwandig uit. Treedt er een lekkage op van de binnenste wand, dan wordt de vloeistof opgevangen door de tweede wand, terwijl tegelijkertijd de inhoud van de tank wordt overgepompt naar een reservebassin.

Tussenopslag

Wanneer men niet overgaat tot solidificatie kort na de opwerking, dan zal men de hoog-actieve vloeistof nog geruime tijd in dubbelwandige tanks moeten opslaan. Is men wel tot solidificatie overgegaan, dan zullen de geproduceerde cylinders met afval nog enkele jaren in een fase van tussenopslag moeten blijven. Men denkt hierbij aan een periode van minimaal tien jaar (gerekend vanaf de splijtstofwisseling), maar liever ongeveer dertig jaar.

In deze periode van tussenopslag neemt de radioactiviteit sterk af: tien jaar na de splijtstofwisseling is het stralingsniveau al met ongeveer 99,95% gedaald! De warmte-afgifte neemt wat langerzamer af: na ongeveer dertig jaar is die gehalveerd. Deze veranderingen betekenen dat het KSA beter hanteerbaar wordt, waarbij tevens geldt dat bij een definitieve opslag na deze interimfase minder effect op de omgeving is te verwachten.

Definitieve opslag

Omdat tussenopslag een vrij stringente bewaking vereist, zoekt men naar mogelijkheden om het KSA definitief op te slaan op een manier waarbij de kans op ongelukken of sabotage gering is. Daarbij denkt men aan opslag ondergronds, met name in speciaal daarvoor aangelegde mijnen; de redenen daarvoor zijn al eerder genoemd.

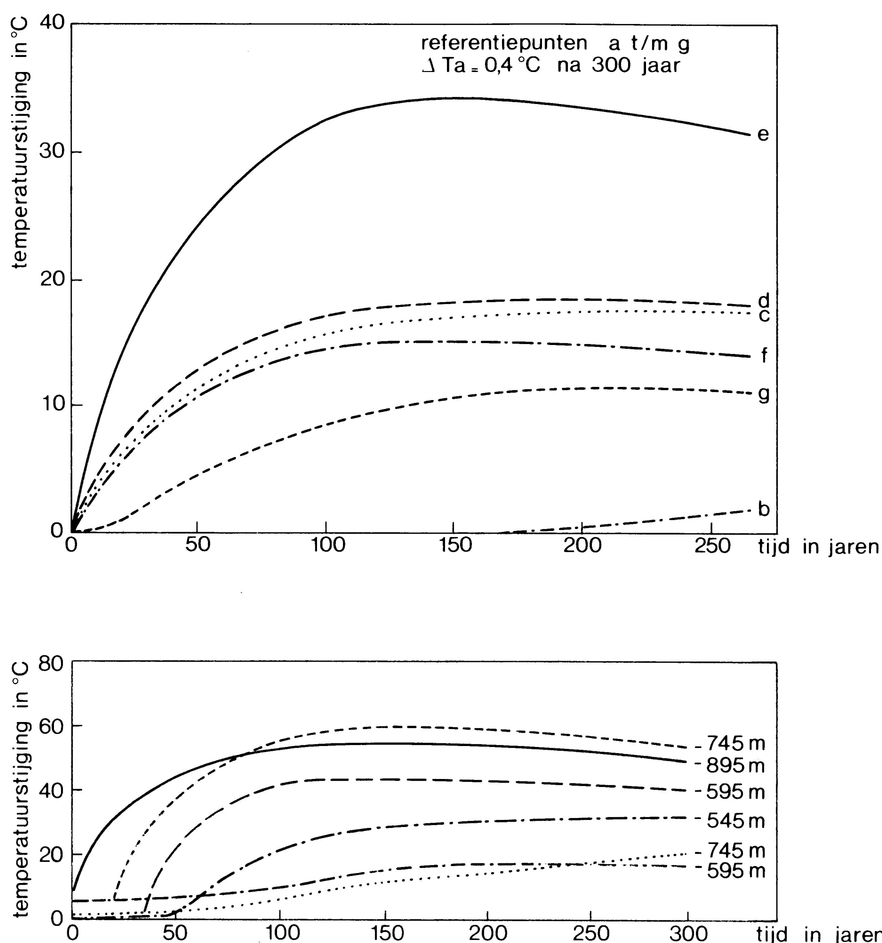
Bij de definitieve opslag wil men de kans op bijvoorbeeld uitlogen van het verglaasde materiaal zo gering mogelijk houden. Daarom worden de glascylinders voorzien van een corrosievaste en dichte omsluiting, bijvoorbeeld roestvrij-stalen vaten. Pas wanneer die toch gecorrodeerd zouden zijn, zou een begin kunnen wor-

den gemaakt met uitloging van het glas. Dit betekent dat er een extra tijdsdrempel wordt ingebouwd. Daarnaast vormt de inkapseling van het glas een extra beveiliging tegen beschadiging tijdens transport en bovendien een bescherming tegen de straling, waardoor de radiolyse van eventueel grondwater wordt teruggebracht tot een uit het oogpunt van corrosie te verwaarlozen laag niveau.
Voor de definitieve opslag komen in principe diverse gesteentetypen in aanmerking, maar de voorkeur gaat uit naar bepaalde soorten (tertiaire) klei, graniet en steenzout. Deze gesteenten hebben voldoende isolerende eigenschappen om het KSA lang genoeg buiten de biosfeer te houden. Discussies over het meest geschikte type gesteente hebben dan ook in feite geen betrekking op de aanvaardbaarheid uit veiligheidsoogpunt, maar op de beschikbaarheid van deze soorten gesteente en op de kosten van de opslagmijn.

Deze kosten zijn met grote nauwkeurigheid vast te stellen, omdat daarbij bekende mijnbouwtechnieken en behandelingsmethoden worden toegepast; een vaste prijs is echter niet te geven, omdat de meerkosten van een relatief grote mijn gering zijn, zodat de invloed van de grootte op de prijs per geleverde kWh aanzienlijk is. Ook bij relatief kleine mijnen in steenzout zal dat bedrag echter minder zijn dan 0,1 cent per kWh. Dit is gemakkelijk na te gaan: een mijn waarin het afval wordt opgeborgen van 500.000 MW-jaar (=500.000 × 1.000 × 6.500 kWh = 3,25 × 10^{12} kWh) zou bij een prijs van 0,1 cent per kWh zelfs 3,25 miljard gulden mogen kosten. Aangezien deze prijs bij lange na niet gehaald wordt, is er dus geen sprake van dat de ondergrondse opslag van KSA grote 'verborgen kosten' voor de kernenergie met zich mee zou brengen.

Warmte-afgifte

De warmte-afgifte van het KSA blijft lange tijd aanzienlijk. In een opslagmijn moet dus rekening worden gehouden met de afvoer van die warmte. Door de vaten KSA op voldoende afstand van elkaar te plaatsen is de warmte-afvoer zonder meer mogelijk. Bij steenzout moet men bovendien rekening houden met de verhoogde plasticiteit door de warmte-afgifte. Dat betekent dat in zout niet volstaan kan worden met opslagruimten waarin de vaten in nissen worden geplaatst op onderling voldoende afstand. Er kan echter wel uitgerekend worden in welke configuratie de opslag een zo gunstig mogelijke warmteverdeling geeft.
Een mogelijkheid hiertoe bestaat uit het boren van een aantal gaten in de 'vloer' van de opslagruimte. Heeft die vloer een oppervlakte van ca. 10.000 m^2 (een cirkel met een straal van 550 m), dan kunnen daarin ongeveer 175 boorgaten aangebracht worden. Als elk boorgat van een begindiepte van omstreeks 600 m doorloopt tot 1.200 m diepte, kunnen in elk gat ongeveer 300 vaten met elk 50 liter verglaasd KSA worden geplaatst, samen ruim 50.000 vaten; dit is het afval van 1 miljoen MW-jaar, dus 2.000 jaar Borssele en Dodewaard samen. De hoogste temperatuur die met deze opstelling zal worden bereikt ontstaat na ongeveer 150 jaar in het centrum van de mijn en bedraagt ca. 35°C meer dan de normale temperatuur (5). Elders en op andere tijdstippen is de temperatuurstijging geringer (figuur 8).
Gaat men uit van een mijn met verschillende niveaus, dan zal de warmte-afgifte in vertikale richting geremd worden, waardoor de temperatuur extra kan oplopen; in het centrale deel kan die (ook weer na ongeveer 150 jaar) zo'n 80°C bedragen (figuur 8). Het verdient dan aanbeveling om kunstmatige koeling toe te passen, bijvoorbeeld via een ventilatiesysteem, vooral omdat een mijn niet in één keer met KSA wordt opgevuld; men zal geleidelijk de hogere niveaus gaan gebruiken. Daar moeten dan uiteraard werkbare omstandigheden heersen.
Dit betekent dat de temperatuur in de galerijen niet mag oplopen tot boven 60°C. Uiteraard kan vlak naast een vat KSA de temperatuur wel hoger liggen; voor een dergelijk 'microgebied' verwacht men maximale temperaturen van omstreeks 150°C.



Figuur 8
Temperatuurstijging in steenzout ten gevolge van opslag van kernsplijtingsafval op één niveau (boven) of vanuit meer niveaus (onder).

Duur van de opslag

De definitieve opslag moet erop gericht zijn om het KSA uit de biosfeer te houden zolang dat gevaar zou kunnen opleveren. Daarbij gaat het vooral om de invloed van de radioactiviteit.

Gedurende de eerste 400 jaar wordt die activiteit vooral bepaald door het verval van strontium-90 en caesium-137; in deze periode wordt de radioactiviteit door dit verval duizendmaal kleiner. Gedurende de volgende periode van enkele duizenden jaren wordt de stralingsintensiteit vooral bepaald door americium-241 en vervolgens door andere transuranen. Die hebben merendeels een zeer lange halveringstijd; bij neptunium-237 bedraagt die bijvoorbeeld ruim twee miljoen jaar.

Op het eerste gezicht lijkt het daarom alsof het KSA miljoenen jaren zou moeten worden geïsoleerd. Die conclusie is echter onjuist, want wanneer de langzaam vervallende transuranen de radioactiviteit bepalen, is die al tienduizend- tot honderdduizendmaal kleiner geworden; het stralingsrisico is dan zeer klein geworden, zelfs wanneer het KSA weer boven de grond zou komen. Een opslag van enkele duizenden jaren is in principe dan ook voldoende; een faciliteit die een ongestoorde opslag mogelijk maakt voor enkele tienduizenden jaren, is dus zeker aanvaardbaar.

Men kan dit ook gemakkelijk vaststellen aan de hand van het zogenaamde RRR (Relatief Radiotoxisch Risico), dat is de hoeveelheid water (in m^3) waarmee een

bepaalde hoeveelheid afval verdund moet worden om aan drinkwaternormen te voldoen. Zo heeft uraniumerts een bepaald RRR (mede afhankelijk van de concentratie uranium) en KSA een ander. Het KSA heeft aanvankelijk een veel groter RRR dan de hoeveelheid erts waarvan het uiteindelijk afkomstig is; maar al na enkele honderden jaren is dat omgekeerd (vooral door het verval van Sr-90).
Wanneer het RRR van KSA even groot is als dat van de corresponderende hoeveelheid erts, is uiteraard afhankelijk van de normen die men aan drinkwater stelt. De *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) heeft in het verleden verschillende normen gehanteerd (6, 7). Steeds geldt echter dat afhankelijk van de gehanteerde norm, het KSA na driehonderd tot duizend jaar minder gevaarlijk is dan het erts. Er bestaan echter nieuwere adviezen (8), waaruit een veel langere periode volgt. Dat is vooral een gevolg van de 'opwaardering' van het element neptunium.
Dit betekent dat toepassing van kernenergie als het ware een bepaalde hoeveelheid radioactiviteit in de tijd 'naar voren haalt', maar uiteindelijk leidt tot een verminderd stralingsniveau. Na enkele honderden jaren is het risico minder dan dat van erts dat men thans zonder problemen op veel plaatsen ter aarde bewoont. Ter vergelijking kan men bovendien stellen dat na ca. tweehonderd jaar het RRR van het KSA van een kernenergiecentrale geringer is dan het afval van een kolencentrale met hetzelfde vermogen (9).

Geschikte gesteenten

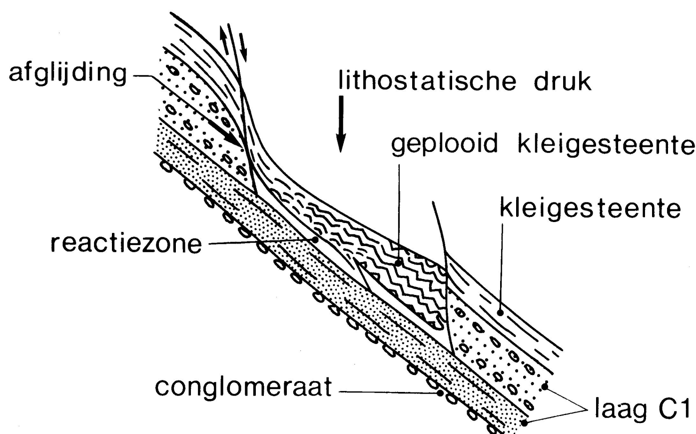
Diverse gesteentesoorten voldoen aan de eisen die men bij opslag van KSA moet stellen. Oude klei, graniet en steenzout worden echter als het gunstigst beschouwd.

Kleilagen

Redelijk ver uitgewerkte plannen (10, 11) om KSA (en eventueel ander afval) op te slaan in kleilagen bestaan alleen in België, waar men in de Kempen de beschikking heeft over zeer stugge en bijna ondoordringbare kleien uit het Tertiair. Deze pakketten zijn voor België vooral interessant omdat ze voorkomen bij de vroegere opwerkingsfabriek van Eurochemie te Mol. Dat betekent dat er geen of nauwelijks transport van het verglaasde afval nodig zou zijn. Dit is vooral van belang omdat in België ernstig wordt overwogen de 'bevroren' opwerkingsfabriek weer in bedrijf te stellen. Door het Studiecentrum voor Kernenergie te Mol is inmiddels een begin gemaakt met een studie naar de werkelijke mogelijkheden. Men denkt daarbij aan een mijn op een diepte van omstreeks 250 m.

Graniet

Graniet wordt in diverse landen (o.a. Zweden) beschouwd als een mogelijkheid om het KSA zeer lang te isoleren. Dat hangt samen met het feit dat veel granietgebieden deel uitmaken van de precambrische schilden die van vrijwel elk continent de 'kern' vormen. Die precambrische schilden zijn dermate verstard, dat er al honderden miljoenen jaren geen verstoringen van enige betekenis meer optreden. Graniet is bovendien een zeer resistent gesteente waardoor de kans dat het KSA uit graniet in de biosfeer terecht kan komen vrijwel uitgesloten is.
In de precambrische schilden komen ook andere gesteentetypen voor die zich in principe goed lenen voor opslag. Het gaat daarbij vooral om sommige typen gneis (een metamorf gesteente) en zandsteen (een afzettingsgesteente). Het stollingsgesteente graniet heeft echter het grote voordeel dat het homogener is, waardoor men bij de aanleg van de mijn en bij de opslag zelf minder rekening hoeft te houden met lokale verschillen.
Zelfs heeft de praktijk uitgewezen dat opslag mogelijk is gedurende lange tijd. In Gabon (bij Oklo) is twee miljard jaar geleden een aantal natuurlijke reactoren in werking getreden (zie figuur 9 en ook het aanhangsel), waarbij ook splijtingspro-



Figuur 9
Synthese van een aantal dwarsdoorsneden door Oklo-reactoren. Met C1 wordt de laag van voornamelijk zandsteen aangeduid, waarin zich oorspronkelijk het uraniumerts heeft afgezet. Daar waar kernsplijting is opgetreden is siliciumdioxyde weggevoerd, waarbij de laag door het bovenliggende gesteente is ingedrukt.

---

dukten zijn gevormd. De instabiele isotopen zijn inmiddels vervallen (o.a. ook het plutonium), maar hun eindprodukten alsook de stabiele splijtingsprodukten heeft men vlak bij de reactor aangetroffen (12); dat betekent dat er, zelfs in ongecontroleerde en niet speciaal aangepaste omstandigheden, een opslag is gerealiseerd die veel langer dan nodig was intact is gebleven. Dit impliceert uiteraard niet dat opslag overal en altijd veilig mogelijk is, maar wel dat de enige ervaring in dit opzicht uitermate positief is.
Wanneer men bovendien extra veiligheidsmaatregelen treft, bijvoorbeeld in de vorm van diepe mijnen, neemt de theoretische kans op een ongeluk uiteraard nog verder af.

Steenzout
Nog geschikter dan klei of graniet lijkt steenzout. In Amerika hebben drie commissies van de *National Academy of Sciences* zich voor deze vorm van opslag uitgesproken. Ook in Nederland zijn de risico's van deze opslagmogelijkheid uitgebreid onderzocht (o.a. 13, 14). De in Asse uitgevoerde experimenten zijn al eerder vermeld.
Het steenzout heeft een aantal grote voordelen. In de eerste plaats bestaat er een ruime ervaring op het gebied van de aanleg van ondergrondse mijnen (15). In de tweede plaats is het een gesteentesoort die wijdverbreid voorkomt in dikke pakketten. En in de derde plaats heeft het zout zelf een aantal gunstige eigenschappen. Het is bijvoorbeeld weliswaar oplosbaar in (grond)water, maar het bevat verontreinigingen (met name klei) die na oplossing als *cap rock* achterblijven en voor een waterdichte afsluiting zorgen; verdere oplossing wordt dan onmogelijk. Steenzout is bovendien door de druk van de bovenliggende lagen plastisch, zodat eventueel optredende spleten of breuken snel worden 'dichtgesmeerd': contacten met het omringende materiaal zijn daardoor kort van duur. Een gevolg van het plastisch gedrag is ook dat het zout plaatselijk is opgestuwd in ruggen of koepels, waardoor het gemakkelijk bereikbaar is, ook al zit de oorspronkelijke laag op duizenden meters diepte. Tenslotte is, wanneer het zout niet verstoord wordt, vaste-stof-diffusie het enige proces waardoor radionucliden getransporteerd kunnen worden. Dit proces vindt zo langzaam plaats, dat er 100 miljoen tot een miljard jaar nodig zou zijn om de stoffen uit hun opslagplaats in de biosfeer te krijgen (16).

Aan het steenzout kleven echter ook bepaalde bezwaren: juist het plastische gedrag betekent dat het zout niet altijd stabiel is (geweest). Zelfs in formaties die nu al vele miljoenen jaren onbeweeglijk zijn, zou opnieuw een beweging kunnen gaan optreden, met name als gevolg van de warmte-afgifte door het KSA. Daarbij moet wel bedacht worden dat men denkt aan mijnen op minimaal 600 m diepte. Zou het zout loodrecht omhoog gaan bewegen met een (geologisch gezien bijna onvoorstelbare) snelheid van 1 cm per jaar, dan zou het nog 60.000 jaren duren voor het KSA aan het aardoppervlak zou komen. Niet alleen is het stralingsniveau dan al tot aanvaardbare normen gedaald, maar ook levert die tijdspanne ruimschoots de mogelijkheid om het afval tijdig weer op te graven en elders onder te brengen, als men dat nodig zou oordelen.

Een ander argument tegen steenzout is dat het niet homogeen is: er komen lagen met verschillende zoutsoorten voor, waarvan er één (carnalliet) problemen zou kunnen opleveren; bij verhitting zou dit zout kristalwater kunnen afstaan waardoor lokaal een pekelige oplossing gevormd zou worden met vloeistofbelletjes die zich naar het afval zouden kunnen bewegen. De chemische agressiviteit hiervan zou voor corrosie en uitloging van het ingekapselde KSA kunnen zorgen. Proefnemingen wijzen er echter op dat een dergelijke aantasting slechts oppervlakkig zou plaatsvinden en uitermate langzaam. Bovendien komt carnalliet slechts in minimale hoeveelheden in het zout voor, zodat het mogelijk is om afschermende maatregelen te nemen.

Zoutkoepels in Nederland

Het ligt voor de hand dat men bij het opslagprobleem van KSA zoekt naar een internationale aanpak. Wat het steenzout betreft is in Europa gesuggereerd om het KSA op te slaan in zoutkoepels onder de Noordzeebodem.

Nederland heeft echter zelf wellicht ook mogelijkheden. De Rijks Geologische Dienst heeft na een voorlopige inventarisatie de koepels bij Gasselte-Drouwen, Schoonlo, Pieterburen, Onstwedde en Anlo genoemd als formaties die nader onderzocht zouden kunnen worden. Daartoe zouden proefboringen in die koepels moeten worden uitgevoerd, maar die zijn inmiddels uitgesteld tot na de Brede Maatschappelijke Discussie.

De afmetingen van deze koepels zijn echter zeer geschikt. Ze voldoen aan de minimale dikte van 500 m, terwijl hun omvang groot genoeg is voor een opslagruimte die aan alle zijden omgeven wordt door een zoutwand van minimaal 200 m dik. In zo'n zoutkoepel kan men minimaal 2.500 m^3 KSA kwijt, dat wil zeggen evenveel als Borssele en Dodewaard gedurende 1.000 jaar produceren.

Samenvatting

Momenteel wordt zowel LAVA als MAVA definitief opgeslagen. Voor de andere soorten radioactief afval is men in de praktijk nog niet zover. Er zijn echter diverse mogelijkheden, waarvan ondergrondse opslag in steenzout momenteel het aantrekkelijkst lijkt. Dit kan gebeuren zonder risico voor het milieu gedurende de tijd dat het afval gevaar oplevert en tegen lage kosten. Technische realisatie van deze opslag is, gebruikmakend van reeds bekende mijnbouwtechnieken, alleszins mogelijk.

Referenties

(1) *Waste Management and Disposal,* Report of INFCE Working Group 7, International Atomic Energy Agency, Wenen 1980.

(2) V.J.M. Salters and P.N.W. Verhoef (eds.), Geology and Nuclear Waste Disposal. *Geologica Ultraiectina Special Publication nr. 1,* 1980.

(3) J. Hamstra and P.Th. Velzeboer, Design Study of a Radioactive Waste Repository to be Mined in a Medium-sized Salt Dome. In: *Fifth Symposium on Salt,* volume 1. Northern Ohio Geological Society, 1980, blz. 251-267.

(4) J.A.R. Hoefnagels, Mining Techniques and Some Aspects of High-Level Waste Disposal, in *Geologica Ultraiectina Special Publication nr. 1,* blz. 203-227.

(5) *De Toekomstige Energie-Situatie in Nederland* (TESIN), Vereniging van Directeuren van Elektriciteitsbedrijven in Nederland, Arnhem 1980.

(6) *Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation,* ICRP Publication 2, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1959.

(7) *Supplement to Report of Committee II,* ICRP Publication 6, International Commission on Radiological Protection, 1962.

(8) *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers.* ICRP Publication 30, Part I and II, Annals of the International Commission on Radiological Protection, Volume 2, nr. 3/4, 1979; Volume 4, nr. 3/4, 1980.

(9) J. Hamstra, Kolenafval versus Kernsplijtingsafval, *Energiespectrum 5* (1981) no. 2, blz. 48-51.

(10) A. Bonne, R. Heremans and N. Vandenberghe, Possibility of Disposing of Conditioned Nuclear Waste in Deep-lying Clay Formations. In: *Geologica Ultraiectina Special Publication nr. 1,* blz. 377-392.

(11) R. Heremans and L. Baetsle, Investigation of the Use of a Clay Formation for Terminal Disposal of Radioactive Wastes. In: *Spent Fuel Processing and Waste Management of Nuclear Power Plants,* Proceedings of the Nuclex Conference, Basel 1978.

(12) *Les Réacteurs de Fission Naturels;* C.R. Réunion Paris, 1977. International Atomic Energy Agency, Wenen 1978.

(13) B. Verkerk, Bijdrage tot de Veiligheidsbeoordeling van het Opbergen van Radioactief Afval in Zout. *Energiespectrum 5* (1981) no. 5, blz. 124-132.

(14) J. Weber, Radiotoxicity of Nuclear Waste and Disposal Possibilities in The Netherlands. In: *Geologica Ultraiectina Special Publication nr. 1,* 1980, blz. 131-141.

(15) A.H. Coogan and L. Hauber (eds.), *Fifth Symposium on Salt,* Volume 1 and 2, Northern Ohio Geological Society, 1980.

(16) *Release Consequence Analysis for a Hypothetical Geologic Radioactive Waste Repository.* Report of INFCE Working Group 7/16, International Atomic Energy Agency, Wenen 1979.

19. REALISTISCHE SCHATTING VAN DE GEVOLGEN VAN EEN ONGELUK MET KERNCENTRALES*

M. Levenson en F. Rahn

Ook al zijn tot nu toe geen ongelukken met kerncentrales gebeurd waarbij radioactieve stoffen voor mensen en de omgeving noodlottig zijn geworden, toch bestaat aanzienlijke zorg over de uiteindelijke veiligheid van kernreactoren. De moeilijkheid bij het schatten van de gevolgen van een ongeluk is, dat nog onvoldoende inzicht bestaat in de wijze waarop de radioactieve stoffen, gevormd in de splijtingsreacties, zich uit de splijtstof kunnen vrijmaken en zich, door het insluitsysteem van de reactor heen, in de omgeving kunnen verspreiden. Dit hoofdstuk en het volgende gaan in op de beste inzichten die op dit terrein momenteel bestaan. Ze concentreren zich op de verspreidingsmechanismen binnen, respectievelijk buiten het insluitsysteem. Een uitvoerige bespreking van de chemische en fysische remmen op de verspreiding van de meeste radioactieve stoffen laat zien, dat de natuur aanzienlijk bijdraagt tot de technische veiligheid. Aan de orde komen ervaringen met beschadigde reactoren, kleinschalige en grootschalige experimenten en de beheerste vernietiging van kernreactoren. Tenslotte wordt het beeld geschetst van de wijze waarop de radioactieve stoffen zich in een ongevalssituatie feitelijk zullen gedragen.

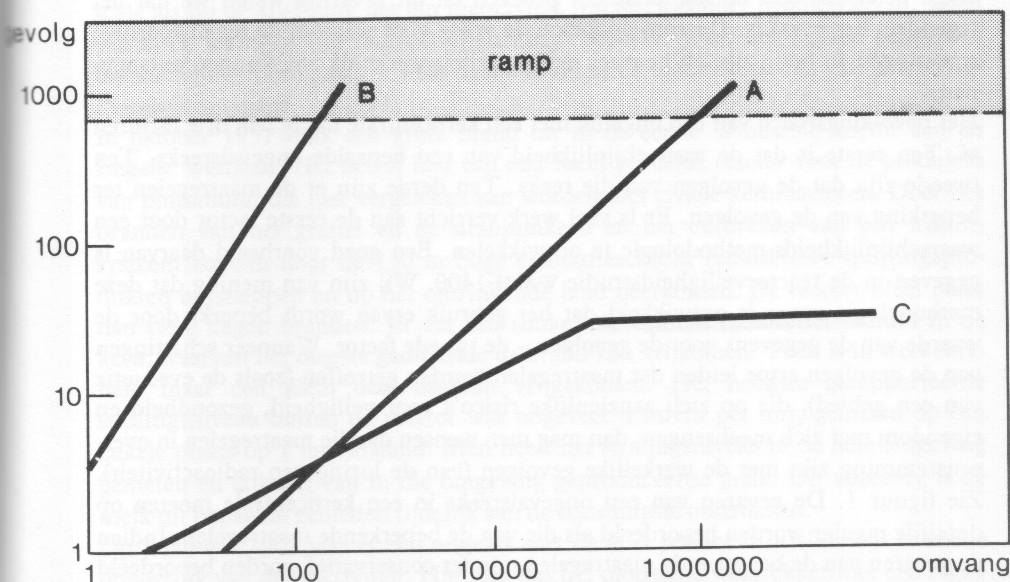
De veiligheid van kerncentrales is verdedigd, en aangevochten, op grond van de onwaarschijnlijkheid dat een belangrijke hoeveelheid radioactiviteit vrij kan komen. Volgens voorstanders van de kernenergie kan dit ten hoogste eens per miljoen jaar gebeuren; tegenstanders van de kernenergie zeggen dat het elk willekeurig moment kan gebeuren en ook dat het vrij vaak zál gebeuren. Dit twistgesprek gaat steeds over de waarschijnlijkheid en geen van beide partijen komt toe aan de vraag, hoe groot nu het gevaar voor de omwonenden is bij de ernstigste lozing die werkelijk zou kunnen optreden.

De dodelijke inhoud van een fysisch systeem is geen maat voor het gevaar dat er van uitgaat. Zo bevat een zwembad genoeg water om de longen van zo'n 100.000 mensen te vullen en hen daardoor te laten verdrinken, maar er is niemand die dit als een juiste maatstaf ziet voor het gevaar van zwembaden. Evenzo is de lucht in een kantoortje, indien in doses van 50 cm^3 in de slagader ingespoten, in staat om 500.000 mensen om te brengen, maar die lucht vormt geen werkelijk gevaar. Hetzelfde geldt voor de radioactiviteit in een kerncentrale – wijd verspreid zou hij een ramp kunnen veroorzaken. Maar of er nu een ongeluk gebeurt of niet, een sterk verspreidingsmechanisme bestaat niet. Bij elk reactorongeluk dat is opgetreden, bij elk ongeluk met kernwapens en bij talloze proeven is gebleken dat de verspreidingsmechanismen de radioactieve lozing sterk beperken. Daarom is een ongeluk met ernstige gevolgen voor de gezondheid van de omwonenden uitgesloten.

Om het eenvoudig te stellen: de uiteindelijke veiligheid van een kerncentrale hangt

* Vertaling van een artikel in *Nuclear Technology,* mei 1981, met toestemming van de auteurs. Ondanks zijn specialistische karakter is dit artikel hier opgenomen, want het geeft een belangrijke nieuwe benadering van de veiligheidsproblematiek van kerncentrales. Voor de referentie naar achtergrondstudies verwijzen we naar het genoemde vakblad (Red.).

niet af van het ontwerp van de ingenieurs. Dit ontwerp bepaalt de betrouwbaarheid en de frequentie waarmee storingen en ongelukken zich voordoen. Maar door natuurlijke processen, zoals chemische reacties, het neerslaan van aerosolen en de inwerking van vocht, wordt een ramp voorkomen. Dit simpele feit wordt in discussies over de veiligheid van kerncentrales dikwijls uit het oog verloren. Na het ongeluk met de centrale op Three Miles Island (bij Harrisburg) staan we misschien meer open voor vragen als: waarom waren de gevolgen voor de gezondheid niet groter? Kwam het omdat God ons genadig is? Nee! Het kwam omdat de natuur ons genadig is! Tenslotte kunnen de insluitsystemen van de ingenieurs het begeven. Maar natuurlijke verschijnselen begeven het niet. Uit ervaring weten we dat natuurlijke verschijnselen zeer effectief zijn in het insluiten van radioactiviteit. Dezelfde natuurlijke insluiting zal ook in toekomstige ongelukken zijn werk doen. De aldus (van nature) ingebouwde veiligheid van kerncentrales heeft niets van doen met theoretische beschouwingen of hypothetische ongevals-scenario's. Of zich een ernstig ongeluk met een kerncentrale zal voordoen hangt niet van onze bekwaamheid af, of van ons geluk. Zo'n ongeluk is mogelijk. Maar de gevolgen zijn evenmin een kwestie van bekwaamheid, of van geluk. Ze worden bepaald, dat is: sterk beperkt, door de natuurlijke verspreidingsmechanismen van radioactiviteit. Daarom kan er nooit een ramp optreden.



Figuur 1

Gevolg van een reactorongeluk van een zekere omvang. Het gevolg is uitgedrukt in het totaal aantal slachtoffers, die door directe bestraling of door geïnduceerde kanker na verloop van tijd overlijden. De omvang is uitgedrukt in het aantal jaren dat verloopt voordat zo'n ongeluk optreedt. Lijn A betreft het resultaat van de gangbare risicostudies, lijn B de zorg der sceptici en lijn C de conclusie van dit artikel.

Figuur 1 toont de gevolgen, uitgedrukt in het aantal slachtoffers, van een ongeluk met kerncentrales, als functie van de tijd tussen de ongelukken, uitgedrukt in jaren – wat een maat is voor de omvang van het ongeluk. Hier heeft lijn A betrekking op de tot nu toe gangbare veiligheidsstudies (zoals WASH-1400) (1), lijn B op de zorgelijke schatting van tegenstanders van de kernenergie, en lijn C op de uitkomst

van nieuwe studies die realistische verspreidingsmechanismen van radioactiviteit in rekening brengen. De achtergrond van de laatste studies zal nu nader worden toegelicht.

Gevaren van een reactorongeluk

Noodplannen voor het geval van een reactorongeluk zijn gebaseerd op schattingen van de stralingsdosis (van de omwonenden, veroorzaakt door de geloosde radioactiviteit). Een nieuwe beoordeling van de tegenwoordige schattingen maakt duidelijk dat deze minstens tienmaal te hoog zijn. Daarom is de bezorgdheid van de bevolking wellicht overdreven en gaat de voorgenomen strategie bij een ongeluk van foute gegevens uit. Dit geldt met name de evacuatie-strategie. Massale evacuatie lijkt bijvoorbeeld niet de veiligste strategie te zijn: schuilen, eventueel aangevuld met evacuatie van de paar mensen vlak bij de centrale, lijkt beter, omdat het kan resulteren in een kleiner algemeen risico voor de bevolking.
Bij het optreden van een reactorongeluk geldt de grootste zorg de mogelijkheid dat de veiligheidsvoorzieningen niet zullen werken, waardoor een grote hoeveelheid radioactiviteit kan ontsnappen. De radioactieve splijtingsprodukten in de reactorkern zullen hun plaats verlaten en daarbij zijn onderworpen aan de wetten van chemische reacties, aerosolgedrag, condensatie enzovoorts. Het falen van alle door de ingenieurs ingebouwde barrières betekent echter niet dat er radioactiviteit van enige betekenis kan ontsnappen. Uit proeven en uit ervaring weten we dat het tegendeel het geval is. Daarom doet zich de vraag voor waarom de tegenwoordige schattingen zo hoog zijn en hoeveel radioactiviteit werkelijk zou kunnen ontsnappen.
Het bevolkingsrisico van een ongeluk met een kerncentrale hangt van drie factoren af. Ten eerste is dat de waarschijnlijkheid van een bepaalde ongevalsreeks. Ten tweede zijn dat de gevolgen van die reeks. Ten derde zijn er de maatregelen ter beperking van de gevolgen. Er is veel werk verricht aan de eerste factor door een waarschijnlijkheids-methodologie te ontwikkelen. Een goed voorbeeld daarvan is gegeven in de reactorveiligheidsstudie WASH-1400. Wij zijn van mening dat deze methodologie zover is ontwikkeld dat het gebruik ervan wordt beperkt door de waarde van de gegevens voor de gevolgen – de tweede factor. Wanneer schattingen van de gevolgen ertoe leiden dat maatregelen worden getroffen (zoals de evacuatie van een gebied), die op zich aanzienlijke risico's voor veiligheid, gezondheid en eigendom met zich meebrengen, dan mag men wensen dat die maatregelen in overeenstemming zijn met de werkelijke gevolgen (van de lozing van radioactiviteit). Zie figuur 1. De gevaren van een ongevalsreeks in een kerncentrale moeten op dezelfde manier worden beoordeeld als die van de beperkende maatregelen. Indien de gevaren van de beperkende maatregelen minder conservatief worden beoordeeld dan de gevaren van de ongevalsreeks, zullen onjuiste beslissingen worden genomen en onjuiste noodplannen worden opgesteld.
In de reactorveiligheidsstudie WASH-1400 is getracht de belangrijke natuurlijke processen (die hier boven werden aangeduid) in een model te beschrijven. Hij is daarin in zoverre geslaagd, dat een grote verbetering optrad in vergelijking met een vroegere studie uit Brookhaven (WASH-740) over hetzelfde onderwerp. Wat echter de gedetailleerde beschrijving van de feitelijke verspreidingsmechanismen betreft houdt WASH-1400 zich veel te weinig bezig met wat er in een kerncentrale kan gebeuren. Die details zijn belangrijk. Het doel van WASH-1400 was de mogelijke gebeurtenissen bij een ongeluk methodisch te onderzoeken en inzicht te krijgen in het gedrag van de systemen van een kerncentrale en in de gevolgen van het ongeluk voor de omwonenden. De nadruk werd gelegd op het onderzoek van het verlies van koelwater (LOCA). Gebrek aan tijd en geld leidde tot vereenvoudigde veronderstellingen. Met name had het onderzoek te lijden van het onvermogen om de

omstandigheden bij een ongeluk in detail vast te leggen. Het resultaat was een doelmatig maar simplistisch model, dat conservatieve schattingen bevatte op de vele gebieden waar de verschijnselen complex of onzeker waren. Daardoor neigt WASH-1400 tot een sterke overschatting van de gevolgen.
Bij het beoordelen van de juistheid van het WASH-1400-model dient aandacht te worden geschonken aan de ervaring met eerdere reactorongelukken, in het bijzonder met die waarbij de kern geheel of gedeeltelijk is gesmolten en waarbij het insluitsysteem is doorbroken. Eveneens van belang zijn de vele experimenten op kleine en grote schaal. Belangrijke gegevens waaraan de modellen moeten worden getoetst worden hierna besproken.

Beschadigde reactoren

Bij een aantal ernstig beschadigde reactorkernen is geen noemenswaardige hoeveelheid radioactief materiaal in de omgeving terecht gekomen. Deze beschadigingen zijn opgetreden bij de Fermi-1-reactor te Detroit, de experimentele kweekreactor in Idaho (1955), het natrium-reactorexperiment (SRE) in Californië (1959), de NRX-reactor te Chalk River (1952) en de Westinghouse-testreactor (1960). Ook zijn er ten minste drie grote reactorongelukken geweest die resulteerden in de lozing van radioactiviteit. Die gebeurden in Windscale, met de SL-1-reactor, en bij Harrisburg; in al deze gevallen was er grote schade aan de reactorkern. Zowel in Windscale als bij de SL-1 ging het om niet-civiele reactoren zonder insluitsysteem. Toch waren de lozingen van radioactiviteit nogal beperkt. Waar het bij alle genoemde beschadigingen om gaat, is welk deel van de in de reactorkern aanwezige radioactiviteit is ontsnapt.
In oktober 1957 brak een grote brand uit in de eerste Windscale-reactor aan de Engelse westkust. Het betrof hier een met lucht gekoelde reactor voor de produktie van plutonium, die niet vergeleken kan worden met civiele kernreactoren. Door het branden van het grafiet en de uraniumkern en het ontbreken van een insluitsysteem konden door de 130 m hoge ventilatieschacht radioactieve splijtingsprodukten ontsnappen en op het omringende land neerkomen. De reactor bleef meer dan twee dagen branden. Er zat een flinke hoeveelheid radioactief jodium in de kern, waarvan het meeste gedurende de brand kon vrijkomen. Toch is in werkelijkheid maar een klein deel daarvan vrijgekomen. Het hoogste gerapporteerde stralingsniveau buiten de reactor was ongeveer 4 mrem per uur, gemeten op één enkele plaats op 1 mijl afstand. Men heeft het stralingsniveau in de hele omgeving gemeten en ook dat van in die omgeving geproduceerde melk. Uit voorzorg is de melk uit bepaalde gebieden tijdelijk aan de consumptie onttrokken.
Op 3 januari 1961 was er een ongeluk met de SL-1 reactor in Idaho door te snelle opvoering van de reactiviteit. Hiervan was het plotseling wegtrekken van een regelstaaf tijdens een (onzorgvuldige) onderhoudsbeurt de oorzaak. De plotselinge toeneming van reactiviteit leidde tot een vermogensuitschieter en ernstige schade aan de kern door oververhitting. Drie personeelsleden kwamen om door verwondingen, veroorzaakt door de stoomschok. De SL-1 was een kleine (3 MW) kokendwaterreactor met natuurlijke circulatie. Het was een militair project waarvan de uitvoering ook aan militairen was overgelaten. De metallische splijtstofelementen waren van een legering van sterk verrijkt uranium met aluminium en ze waren voorzien van een bekleding uit een aluminiumlegering. Er waren maar een paar veiligheidsvoorzieningen. In deze opzichten verschilde de SL-1 sterk van een moderne vermogensreactor. Ongeveer 19% van de kern smolt (als gevolg van de oververhitting) en dus zou ditzelfde percentage van de gevormde splijtingsprodukten hebben kunnen vrijkomen. Niettemin is niet meer dan 0,1% van de niet-vluchtige splijtingsprodukten uit het tochtige metalen gebouw in de omgeving terecht gekomen. Metingen in de omgeving leerden bijvoorbeeld dat maar 20 Ci jodium-

131 ontsnapt was van de 28.000 Ci die in de kern zat, en evenzo maar 0,5 Ci caesium-137 van de 3.100 Ci en 0,1 Ci strontium-90 van de 3.070 Ci. Wanneer we dit vergelijken met een moderne vermogensreactor, die zorgvuldig is ingesloten in een gasdicht gebouw met compartimenten, dan mag een veel sterkere reductie verwacht worden. Maar ook al bij het SL-1-ongeluk was de lozing van radioactieve splijtingsprodukten, met name voorzover ze niet vluchtig of in aerosolvorm waren, nogal klein door de werking van fysische en chemische wetten. Onlangs zijn deze lozingen nagerekend met verbeterde versies van het CORRAL-model en het CRAC-model. De berekeningen laten zien dat de lozingen sterk worden overschat als men de fysische en chemische verschijnselen bij de aanvankelijk snelle verspreiding niet goed beschrijft.

Het recente ongeluk met de centrale op Three Miles Island in maart 1979 resulteerde in de lozing van ongeveer 15 Ci jodium-131. Dit was minder dan het tienmiljoenste deel van het jodium-131 in de reactorkern. Een veel groter deel van de edelgassen xenon en krypton ontsnapte (ongeveer 2,5 miljoen Ci of 2% van de kerninhoud). Verwaarloosbare hoeveelheden barium-140 werden geloosd. De stralingsniveaus buiten het reactorgebouw bleven meestal beneden 1 mrem per uur. In dit geval was er echter geen lek in het insluitsysteem: de lozingen waren afkomstig uit kleine lekken van hulpsystemen. Binnen het insluitsysteem zelf werd de verspreiding van radioactiviteit beperkt door neerslag en afzetting van splijtingsprodukten in de hulpsystemen.

Beheerste kleinschalige experimenten

In aanvulling op de ervaring met reactorongelukken hebben we experimentele gegevens over de beperkende rol van de verspreidingsmechanismen. Verschillende aspecten van deze verspreiding van splijtingsprodukten zijn apart onderzocht. Het gaat hier in de eerste plaats om verschijnselen bij het smelten en verdampen van (bestraalde) splijtstof.

Recent onderzoek bij Rockwell International van uraniumdioxyde-aerosolen bij hoge temperatuur en hoge concentratie heeft aangetoond dat het verval wordt gekarakteriseerd door twee relaxatietijden. De eerste is van de orde van seconden, een tijd waarin 90% van de aerosolmassa is uitgezakt, en de tweede van de orde van tien minuten, een tijd waarin de resterende 10% in zeer kleine deeltjes verdwenen is. Eerdere experimenten konden dit niet aantonen in verband met de moeilijkheid metingen te doen binnen een paar minuten nadat het aerosol was gemaakt. Nog recenter onderzoek wijst er op dat bij een hoge concentratie (0,07 tot 1,09 kg/m^3) de samenklontering zo snel is en de resulterende deeltjes zo groot zijn (0,1 tot 0,4 mm) dat het merendeel van het aerosol in duizendsten van een seconde uitzakt, daarbij ook kleine deeltjes meeslepend.

In Karlsruhe is uitgezocht dat bij het smelten van een standaardreactorkern 1 tot 2,5 ton aerosol zal ontstaan. Dit aerosol bestaat voornamelijk uit uraniumdioxyde en constructiemateriaal, dat nauwelijks radioactief is, en het wordt, afhankelijk van de ongevalsreeks, in het drukvat of het reactorgebouw verspreid. Het aerosol is onder deze omstandigheden zeer onstabiel en zal daarom snel uitzakken. Samen met de grote hoeveelheid niet-radioactief aerosol zullen dan ook de radioactieve deeltjes met splijtingsprodukten worden verwijderd. Bedenk dat dit ook zal gebeuren als er geen vochtige omgeving is, die het uitzakken van de deeltjes aanzienlijk kan versnellen (door condensatie, waardoor zware waterdruppels ontstaan).

Eerder werk te Oak Ridge aan uraniumdioxyde-splijtstof toonde aan dat inderdaad bijna alle jodium, tellurium en caesium, en meer dan de helft van het strontium, zirconium, ruthenium, barium en cerium uit de gesmolten splijtstof vrijkomen. Met uitzondering van het jodium, tellurium en caesium condenseren al deze splijtingsprodukten echter en zetten zich af in de hete omgeving van de splijtstof.

Recent experimenteel werk uit dezelfde plaats laat zien dat zich in (of op) de splijtstofmatrix caesium-jodide (*CsJ*) vormt voordat dit vrijkomt. Dit houdt in dat de elementen jodium en caesium in (of op) de splijtstof een chemische verbinding kunnen aangaan, wat de verspreiding van beide vluchtige elementen bemoeilijkt. Een soortgelijke chemische reactie in (of op) de splijtstof wordt verwacht tussen tellurium en caesium tot caesiumtelluride (Cs_2Te). Dit resulteert erin dat gedurende een reactorongeluk, waarbij de kern smelt, het jodium, tellurium en caesium vooral als ion zullen optreden en worden vastgehouden in vocht. Dit is een belangrijk verschijnsel, omdat de genoemde radioactieve stoffen sterk bijdragen aan het radiologische risico. Nog weer ander werk te Oak Ridge aan gedeeltelijk gesmolten splijtstofelementen, opgebouwd uit veel splijtstofpennen, toonde dat onbetekenende hoeveelheden aerosol-radioactiviteit ontsnapten. Dit was een sterk verschil met soortgelijk werk aan enkelvoudige pennen, waar honderd keer meer aerosol-radioactiviteit bij vrijkwam. Het laat zien dat de niet gesmolten delen van het splijtstofelement en de bekleding daarvan geschikte oppervlakken bieden voor het afzetten van vrijgekomen splijtingsprodukten.
Bij een reactorongeluk met kernsmelting zullen er altijd koele oppervlakken boven de kern aanwezig zijn, zoals de wand van het drukvat en de wanden van de pijpen van het primaire circuit. Dit betekent dat er altijd, gedurende vele uren, zowel water als stoom aanwezig is. Resultaten van het *Aircraft Nuclear Propulsion*-laboratorium van General Electric tonen aan dat het caesium op zulke oppervlakken neerslaat als de temperatuur tussen 550 en 1.000°C is, en het jodium als de temperatuur tussen 30 en 350°C is. In Brookhaven vond men dat in bepaalde gevallen 90% van het vrijgekomen jodium dankzij een omgeving met stoom kan worden neergeslagen op wanden met een temperatuur beneden 60°C. Weer andere experimenten wijzen er op dat caesium en jodium worden afgezet op aerosol-deeltjes, maar dit is verder moeilijk te meten. Kwalitatief staat vast dat dit verschijnsel bij aerosolen met een hoge concentratie snel kan verlopen. Deze experimenten hebben belangrijke implicaties voor ongelukken waarbij geen water in de onmiddellijke omgeving van de kern is. Hier kunnen materialen met een laag smeltpunt (zoals de 500 kg zilver, indium en cadmium in de regelstaven van een drukwaterreactor) een aerosol vormen op het moment dat het jodium en tellurium vrijkomen, dat dan dient als condensatie-oppervlak voor de laatste elementen.
Werk te Hanford aan het vrijkomen van splijtingsprodukten bij hoge temperatuur leverde het volgende op: de radioactiviteit, vrijgekomen in een stoom-atmosfeer, was de helft van de radioactiviteit vrijgekomen in lucht. Dit werk had betrekking op metallische splijtstof, maar het aerosolgedrag is direct toepasbaar op de oxydische splijtstof die in commerciële lichtwaterreactoren gebruikt wordt. Verder vond men dat de vluchtige splijtingsprodukten jodium, tellurium en caesium, eenmaal vrijgekomen uit de splijtstof, bij een stoom-atmosfeer veel meer in het meetapparaat bleven zitten dan bij een gewone atmosfeer (lucht). Ze zetten zich op een afstand van een paar centimeter van de gesmolten splijtstof af. In het geval van jodium was de afzetting bij lucht 10% en bij stoom 60%. Het effect van stoom op het neerslaan van splijtingsprodukten werd vervolgens onderzocht. Bijna 97% van het jodium, 77% van het tellurium en 80% van het caesium werd in de gecondenseerde stoom teruggevonden. Men concludeerde dat stoom bijna net zo effectief was als een goed filter in de ventilatieschacht. Experimenten elders hebben soortgelijke resultaten opgeleverd.
Wanneer het insluitsysteem (als gevolg van een geleidelijke drukopbouw na het smelten van de reactorkern) zou bezwijken, zal dat leiden tot onregelmatige scheuren in de betonnen wanden. Deze lekken hebben ruwe oppervlakken, zodat extra verwijderingsprocessen van het aerosol, zoals gewone inslag, een rol gaan spelen. Experimenten met aerosolen die door scheuren worden geleid hebben laten zien dat die processen sterk werken en dat het grootste deel van het aerosol in de scheur

achterblijft. Bovendien zal zich vocht in die scheuren verzamelen, dat dient als een verder filter op de lozing.

Beheerste grootschalige experimenten

In het begin van de jaren zeventig werden zes experimenten uitgevoerd te Brookhaven in het CSE-insluitsysteem. Men bestudeerde de tijdsafhankelijkheid van de concentraties jodium, caesium, ruthenium en uranium in een ruimte die slechts vijf keer kleiner was dan het insluitsysteem van een drukwaterreactor. Het verdwijnen van de splijtingsprodukten gebeurde alleen door natuurlijke processen. In volgorde van belangrijkheid waren dat de afzetting in het apparaat dat de elementen injecteerde, de afzetting op de wanden van het insluitsysteem en via lekken van dit systeem.

De bovengenoemde CSE-experimenten toonden ook aan dat het jodium zich hecht aan stofdeeltjes en wordt geabsorbeerd door waterdruppels. Caesiumdeeltjes die werden geïnjecteerd reageerden met het jodium tot caesiumjodide. Ondanks het feit dat men zijn best deed om met 100% efficiëntie te injecteren werd 28% van het jodium en 67% van het caesium in het injectie-apparaat afgezet. Zodra de deeltjes in de stoom, waarmee het insluitsysteem gevuld was, terecht kwamen werden het de condensatiekerntjes van mistdruppeltjes. Het jodium werd zeer snel door de mist geabsorbeerd tot evenwicht ontstond tussen damp en vloeistof. Aanvankelijk was de halveringstijd van de jodiumconcentratie tussen 9 en 24 minuten, maar later nam die toe tot bijna 20 uur. Na twee uur was de decontaminatiefactor 30 tot 1.000, wat betekent dat er dertig- tot duizendmaal minder jodium was dan aanvankelijk. Na een dag was er tussen honderd- en vijfentwintighonderdmaal minder. Het caesium gedroeg zich ongeveer net zo, ofschoon de decontaminatiefactor na twee uur kleiner en na een dag veel groter was. Men vond dat de grootste hoeveelheid caesium (72 tot 90%) op de vloer terecht kwam. Ongeveer 50% van het jodium en 10% van het caesium werd afgezet in de verf aan de binnenkant van het insluitsysteem, in overeenstemming met de geneigdheid van het jodium om zich te binden aan organische stof. Bedenk dat een typische drukwaterreactor is geplaatst in een insluitsysteem met 10 tot 20 ton verf op de wanden.

Beheerste vernietiging van reactoren

Experimentele reactoren zijn in het verleden moedwillig vernietigd om te verifiëren dat grote vermogensuitschieters zichzelf beperken en vanzelf de kettingreactie beëindigen. Dit bleek inderdaad het geval te zijn. De proefnemingen werden zodanig opgezet dat de reactorkern met geweld uit zijn verband werd gerukt, waarbij de splijtstof gedeeltelijk smolt of verdampte. Als bijprodukt van de experimenten werd de verspreiding gemeten van radioactiviteit in de omgeving. Het gaat hier over test met de BORAX-1 in 1954, de SPERT-1 in 1962 en de SNAPTRAN in 1963, alle drie in de woestijn van Idaho. De reactorkern was steeds betrekkelijk nieuw en bevatte dus weinig splijtingsprodukten.
De BORAX-1 was eerst zeer succesvol gebruikt voor een aantal proeven met vermogensuitschieters en begon tekenen van dit buitensporige gebruik te vertonen. Toen men inzag dat het nuttige gebruik op zijn eind liep werd besloten tot een vernietigende vermogensuitschieter om te zien wat er zou gebeuren. Eén van de te onderzoeken effecten was welk deel van de radioactieve inhoud bij het kapot gaan van de splijtstof in de omgeving terecht zou komen. De reactor werd uitgerust met speciale regelstaven die zeer snel uit de kern getrokken konden worden en geladen met een overmaat aan reactiviteit. Hij werd in een tank geplaatst die gedeeltelijk in de grond werd verzonken en van een reactorgebouw werd afgezien. Men heeft

deze laatste test gefilmd. Die film toont dat de tank (met water onder lage druk) openbarstte en dat zijn inhoud bijna helemaal in de lucht werd geslingerd. Herkenbare fragmenten van de splijtstof werden tot 60 m verspreid, maar in essentie alle splijtstof kon men binnen een afstand van 100 m terugvinden. Op grondniveau blies een wind van 13 km per uur en op 80 m hoogte een wind van 32 km per uur. Zelfs onder deze omstandigheden werkten beperkende verspreidingsmechanismen.
Het vernietigingsexperiment met de SPERT-1 werd eveneens gedaan in een open opstelling. De reactor was overdekt door een licht bouwsel dat niet als insluitsysteem bedoeld was. Onder volledig gedocumenteerde meteorologische omstandigheden werd op 6 november 1962 de reactiviteit zeer snel opgevoerd. Ongeveer 35% van de splijtstof smolt en alle splijtstofplaatjes werden daardoor beschadigd. De temperatuur overtrof 1.200°C (het ging om metallische splijtstof in legering met aluminium). Ongeveer 20 kg sponsachtige brokjes, waarvan de kleinste nog geen 0,1 mm waren, werd verzameld. Naar schatting 240.000 Ci werd geloosd, wat neerkomt op minder dan 1% van de radioactieve inhoud van de kern. Dit was ruim tienmaal minder dan van te voren berekend was (16%).
Het vernietigingsexperiment met de SNAPTRAN werd in mei 1963 gedaan in een open vat zonder gebouw. Weer werd de reactiviteit zeer snel opgevoerd zodat de kern kapot ging en de helft van het water in de tank naar buiten spoot. In deze uitbarsting werd ongeveer 500.000 Ci radioactief jodium vrijgemaakt. Al dit jodium werd in het binnengebleven water teruggevonden. Bij een eerdere proefneming zonder water was veel jodium vrijgekomen.
De betekenis van al de hierboven beschreven experimenten ter bepaling van de bronterm *(jargon voor de hoeveelheid radioactief materiaal die bij het smelten van een reactorkern vrijkomt - Red.)* is, dat ze steeds een kleinere bronterm opleverden dan wordt voorspeld door de modellen die ook nu nog gebruikt worden bij het vaststellen of een vergunning voor de bouw van een kerncentrale kan worden verleend of niet.

De feitelijke bronterm

Ofschoon studies zoals WASH-1400 hun beperkingen hebben, hebben ze wel duidelijk gemaakt dat alleen reactorongelukken waarbij een flink stuk van de kern smelt risico's voor de omgeving inhouden. Om de zaak echter eenvoudig te houden gaan die studies er van uit dat ook al een klein beetje smelting binnen enkele minuten tot een catastrofale breuk of scheur in het drukvat en het insluitgebouw zal leiden. Dit is niet realistisch. Maar zelfs als we dit aannemen, dan nog tonen die studies aan dat in minder dan 2% van de gevallen de radioactiviteit boven de grond vrijkomt. Deze lozing heeft de ernstigste gevolgen. In de andere gevallen komt de radioactiviteit via de grond vrij, nadat de gesmolten kern door het reactorvat en de betonnen fundering is gezakt. Door de lange tijd die daarmee gemoeid is, is de radioactiviteit van deze lozing kleiner en zijn de gevolgen minder ernstig. Voor beide lozingen geldt echter dat de hoeveelheid radioactiviteit die in de omgeving terecht komt aanzienlijk zou zijn. Op de korte termijn zouden vooral het radioactieve jodium en tellurium de bevolkingsdosis bepalen. Op de tweede plaats zouden de radioactieve aerosolen komen en op de derde plaats, met een bijdrage van een paar procent van de totale dosis, zouden de radioactieve edelgassen komen. Nu zijn deze studies wel verhelderend op het punt van de waarschijnlijkheid van bepaalde ongevalsreeksen die tot kernsmelting kunnen leiden, maar hun voorspelling van de radioactiviteit die uiteindelijk wordt geloosd is zonder uitzondering te hoog.
Als voorbeeld nemen we de reductiefactor voor het jodium, zoals die in WASH-1400 wordt geschat. Men komt daar op 1,5 door enige condensatie en oplossing te

veronderstellen en uitwassing in waterdruppels en condenserende stoom. Indien echter iets andere veronderstellingen worden gemaakt kan de reductiefactor oplopen tot waarden tussen 6 en 100.000. Deze veronderstellingen hebben betrekking op het oplossen van jodium in watertanks en laten veel van de bovengenoemde afzettingsmechanismen nog buiten beschouwing. Dit geeft al aan hoe gevoelig de reductiefactor is voor kleine veranderingen in de veronderstellingen. Indien alle relevante verschijnselen in rekening worden gebracht komt men op waarden tot boven 100.000.

De volgende verschijnselen zijn relevant:

- Stabiele aerosolen, die zich gemakkelijk verspreiden, zijn moeilijk te maken. Wanneer de concentratie hoog is klonteren ze snel samen en zakken ze uit. Wanneer de concentratie laag is, zal de aanwezigheid van waterdamp leiden tot een snelle vergroting van de dichtheid, waarbij de deeltjes zo groot worden als waterdruppels.
- Aerosolen klonteren samen en worden gevangen op de wanden als ze door gaatjes en scheuren stromen, om het even of het gaat om pijpen of muren van compartimenten of insluitgebouwen.
- Samengeklonterde aerosolen zakken dicht bij de plaats van hun ontstaan uit. Daarbij is de aanvankelijke massa der deeltjes, die groot mag zijn, niet belangrijk, want alleen een klein gedeelte van de aerosolen blijft in de lucht zweven.
- Jodium is in veel gevallen fysisch en chemisch reactief. Omdat bijna de hele binnenkant van het insluitsysteem met verf, plastic of organische films is bedekt, zal het sterk worden gebonden. Verder zal het jodium worden opgenomen door het oppervlak van aerosoldeeltjes, die zelf snel samenklonteren en uitzakken. In beide gevallen zal het meeste jodium snel worden vastgelegd.
- Het insluitgebouw met alles wat daar in is biedt een zeer groot koud oppervlak voor het neerslaan en aanhechten van splijtingsprodukten. Door de indeling van het gebouw in compartimenten en de complexiteit van pijpen en hulpapparatuur, zal alle ontsnappende radioactiviteit met veel verschillende oppervlakken in aanraking komen voordat zij naar buiten kan. Tot nu toe is dit slechts gedeeltelijk in rekening gebracht.
- Vocht in het insluitgebouw zal de meeste oplosbare splijtingsprodukten, die eerst in de lucht terecht zijn gekomen, tot zich trekken. Een kernsmelting zal altijd gepaard gaan met grote hoeveelheden stoom en water, omdat hij immers te wijten is aan het verlies van koelwater in het primaire systeem. Regen of mist zullen werken zelfs voordat het sproeisysteem is aangezet. Dit komt omdat het insluitgebouw koud is en door zijn grote warmtecapaciteit lang koud blijft, zodat stoom op de wanden condenseert en daar van neerdrupt. Het effect is dat grote hoeveelheden splijtingsprodukten zullen worden uitgewassen voordat het insluitsysteem uiteindelijk bezwijkt. Zoals eerder gezegd, leidt vocht tot samenklontering van het aerosol.
- De aarde zelf werkt als een filter en houdt effectief alle splijtingsprodukten vast die vrijkomen bij het doorsmelten van de betonnen fundering of het openscheuren van het insluitgebouw onder het maaiveld. Bij grote overdruk in het gebouw zal het trouwens waarschijnlijk zijn dat de overdrukbeveiligingen die uitmonden op de bijgebouwen het eerst opengaan. Dit verlengt de weg die de splijtingsprodukten moeten afleggen voor ze de omgeving kunnen bereiken en biedt een verdere gelegenheid tot afzetting en neerslag van radioactiviteit.
- Zelfs in het geval van openbarsting van het insluitsysteem zullen de grote hoeveelheid water en de warmtecapaciteit van het insluitsysteem een belangrijk deel van de radioactiviteit stilleggen. De grote rol van het water is gebleken bij de SNAPTRAN-experimenten.

Door al deze verschijnselen wordt het gevaar van de reactor voor zijn omgeving sterk verkleind. Ze werken alle in dezelfde richting, namelijk dat de grootte van de

lozing van splijtingsprodukten kleiner is dan wordt voorspeld en dat het karakter van de lozing verschuift in de richting van de edelgassen, omdat met name het jodium en de aerosolen worden vastgehouden. Beide veranderingen verkleinen het risico van de omwonenden, zowel wat directe als wat latente slachtoffers betreft, en ook verkleinen ze het gebied dat ernstig zou kunnen worden bedreigd. Geen van de verschijnselen is afhankelijk van de vraag of er nog wel elektrische voeding is, of de hulpapparatuur wel goed functioneert en of iemand wel de juiste beslissing neemt. Ze werken altijd.

Onze conclusie is daarom, dat de gangbare modellen waarmee de verspreiding van splijtingsprodukten wordt berekend te weinig dedetailleerd zijn en daarom gevolgen voorspellen die veel groter zijn dan ooit bij experimenten is gebleken.

(Het slot van dit artikel, dat we hier weglaten, bevat een beschouwing van de tijdschaal waarop ernstige ongelukken zich zullen afspelen, die, samen met de boven besproken herziening van het radiologisch risico, leidt tot aanbevelingen voor noodplannen. Red.)

Referentie

(1) *Reactor Safety Study,* An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants, NUREG 75/014 (WASH-1400), United States Atomic Energy Commission, oktober 1975.

20. RISICO-ANALYSE VAN KERNCENTRALES IN NEDERLAND

B.Th. Eendebak

Lag in het vorige hoofdstuk de nadruk op het gedrag van splijtingsprodukten bij een reactorongeluk, hier gaat het vooral over de gevolgen. Deze zijn te voorspellen op grond van de kennis van de gezondheidseffecten die besproken zijn in de hoofdstukken 13 en 14. Tevens wordt een beschrijving gegeven van de manier waarop men een indruk kan krijgen van de kans op een ongeluk met een bepaald gevolg. Het risico, dat mede bepaald wordt door deze kansen en gevolgen, zal door de één anders gewaardeerd worden dan door de ander. Dat is een problematiek waarop het volgende hoofdstuk ingaat. Het is op dit moment niet mogelijk met zekerheid te zeggen hoe en in welke mate de radioactieve stoffen zich bij een ernstig ongeluk in de omgeving zullen verspreiden. Als het er veel zijn, zal hun energie-inhoud echter voldoende groot zijn voor een aanvankelijke opstijging, waardoor de stralingsdosis ook in de directe omgeving van de reactor wordt beperkt. Op grond van deze en andere nieuwe inzichten op het gebied van de verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen daarvan voor de mens kan aangetoond worden dat een 'extreme ramp' met een kerncentrale in Nederland nooit meer dan enkele tientallen directe slachtoffers zal kunnen veroorzaken.

Inleiding

Voor de kernenergiecentrales in Dodewaard en Borssele en voor eventueel in de toekomst te bouwen kerncentrales van 1.000 MW(e) zijn in Nederland uitgebreide risico-analyses uitgevoerd. Deze studies zijn min of meer gebaseerd op een Amerikaanse studie (1) uit 1975, waarin voor het eerst op een uiterst systematische wijze de risico's van ongevallen bij kernenergiecentrales werden geanalyseerd.
Bij een diepgaande discussie over risico's zullen tenminste de volgende vier aspecten ter sprake moeten komen:
a. Risico-identificatie. Iedere risico-analyse zal moeten beginnen met een inventarisatie van mogelijke ongewenste gebeurtenissen of verliezen.
b. Schatting van de waarschijnlijkheid. Van alle 'mogelijk geachte' gebeurtenissen dient de waarschijnlijkheid bepaald te worden.
c. Schatting van de gevolgen. Van alle gebeurtenissen dienen de gevolgen voor het milieu of de gezondheid van de mens zo nauwkeurig mogelijk bepaald te worden. Een schatting van de waarschijnlijkheid en van de gevolgen van een bepaalde gebeurtenis wordt wel een risicoschatting genoemd. Samen met een zo compleet mogelijke risico-identificatie spreekt men meestal van een risico-analyse.
d. De waardering van de ernst van het mogelijk verlies. De negatieve effecten van bepaalde activiteiten zullen door de één heel anders ervaren worden dan door de ander. Men spreekt wel van risico-perceptie. Deze waardering kan ook variëren voor verschillende groepen uit de bevolking en zal een rol dienen te spelen bij de beoordeling van risico's. De term risico-evaluatie heeft een ruimere betekenis dan de hierboven genoemde begrippen. Risico-evaluatie heeft betrekking op zowel de risico-analyse en de waardering van de gevolgen als op het afwegen van deze risico's tegen het nut van de desbetreffende activiteit. Bij de besluitvorming over het gebruik van energiesystemen en de maatschappelijke aanvaardbaarheid daarvan zullen ook sociale, culturele en politieke aspecten ter sprake komen en zullen de

risico-evaluaties van de verschillende energiesystemen met elkaar vergeleken worden. Soms wordt hiervoor de term risico-management gebruikt.
Van al deze genoemde aspecten, die van belang zijn voor de afweging en beoordeling van het gebruik van uranium voor de opwekking van elektriciteit, komen in dit hoofdstuk alleen de risico's van kernenergiecentrales ter sprake. De lozingen van radioactiviteit tijdens normaal bedrijf zijn reeds elders behandeld.

Tabel I. Overzicht van hoeveelheden radioactieve stoffen in de splijtstofcyclus

Plaats	Materiaal of omgeving	Radioactiviteit hoeveelheid in curies	 belangrijkste isotopen
1000 MW(e) kernenergiecentrale reactorkern	100 ton splijtstof, ½ uur na stopzetten van de reactor	8×10^9	^{131}J*) ^{137}Cs
splijtstofopslagbassin	30 ton splijtstof, 3 dagen afkoeltijd	$1{,}3 \times 10^9$	^{90}Sr ^{241}Pu
splijtstofopslagbassin	30 ton splijtstof, 150 dagen afkoeltijd	$1{,}4 \times 10^7$	^{132}Te
radioactief afval	harsen, precoatslurries, filters, etc.	10^4 à 10^6	^{60}Co, ^{51}Cr
bij ontmanteling te beschouwen	kernconstructie, reactorvat	$\cong 10^6$	^{60}Co, ^{63}Ni
Transporten bestraalde splijtstofelementen	4 ton in type B transport-containers	7×10^6	^{137}Cs, ^{90}Sr ^{241}Pu, ^{132}Te
radioactief afval	500 ton in type A transport-containers op binnenschip	100	^{60}Co, ^{51}Cr
Fabricage splijtstofelementen UF_6-transportvat (verrijkt uranium)	2 ton UF_6	4	^{234}U, ^{235}U
bij fabricage van *Pu*-elementen: transportvat met mengkorrels	125 kg splijtstof met 6,25 kg *Pu*		plutonium
handschoenkast	50 kg splijtstof met 2,5 kg *Pu*		plutonium
Verrijkingsinstallatie (hoeveelheden betrokken bij het proces) UF_6-transportvat	12 ton UF_6 per vat	8	^{234}U, ^{235}U
(natuurlijk uranium) UF_6-transportvat	2 ton UF_6 per vat	4	^{234}U, ^{235}U

*) Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368

Principe van een risico-analyse

De berekening van risico's verbonden met ongevallen bestaat uit een aantal opeenvolgende stappen. In de eerste plaats dient men te weten hoeveel radioactieve stoffen zich op een bepaalde plaats in de splijtstofcyclus bevinden. Vervolgens moet de kans worden bepaald dat die hoeveelheid, of een gedeelte ervan, vrijkomt in het milieu. Combinatie van deze twee gegevens geeft een indicatie over die plaatsen in de splijtstofcyclus waar de risico's het grootst zijn. Worden de verschillende fasen van de splijtstofcyclus op deze wijze geanalyseerd dan blijkt dat in de kerncentrale

de grootste hoeveelheden radioactieve stoffen voorkomen. Een overzicht van hoeveelheden radioactieve stoffen in de splijtstofcyclus is gegeven in tabel I. Bovendien bevinden deze zich in de kern bij hoge temperatuur en druk. Hieruit volgt dat relatief het grootste risico optreedt bij de kerncentrales. De risico's voor de bevolking ten gevolge van de andere fasen van de splijtstofcyclus in Nederland blijken veel kleiner te zijn. Om deze reden wordt de meeste aandacht gevestigd op het risico verbonden met de kerncentrale zelf.

Hieronder volgt een overzicht van de wijze waarop een risicoanalyse voor kernenergiecentrales wordt uitgevoerd. De risico-analyse van ongevalssituaties bij kernenergiecentrales is te verdelen in vier belangrijke gedeelten, namelijk:
a. beschrijving van de te beschouwen ongevallen;
b. bepaling van de hoeveelheid naar de omgeving vrijkomende radioactieve stoffen na een reactorongeval;
c. de waarschijnlijkheid van het plaatsvinden van deze ongevallen; en
d. de verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen voor de bevolking.
Wij geven nu eerst een korte toelichting op deze onderdelen van de berekening.

a. Beschrijving van de te beschouwen ongevallen
Essentieel bij een risico-analyse is de vraag of alle risico's wel geanalyseerd zijn of dat wellicht mogelijke ongevallen over het hoofd zijn gezien.
Het aantal componenten dat deel uitmaakt van voor de veiligheid belangrijke systemen en het aantal mogelijke interacties tussen dergelijke componenten, dat van invloed kan zijn op het verloop van een ongeval, is dermate groot dat het ondoenlijk is om uitgaande van de mogelijkheid van falen van individuele componenten zekerheid te hebben dat alle potentiële ongelukken waarbij radioactiviteit kan vrijkomen zijn geanalyseerd. Bij een benadering echter die uitgaat van de bron van het risico, dat wil zeggen de radioactieve stoffen, kan een veel grotere zekerheid verkregen worden. Immers de plaatsen in een kernenergiecentrale waar zich radioactief materiaal bevindt, de hoeveelheid radioactiviteit en de isotopensamenstelling zijn nauwkeurig bekend. Ook de verschillende barrières die deze radioactieve stoffen omsluiten en die het naar buiten vrijkomen moeten verhinderen zijn bekend, zodat op eenvoudige wijze de mogelijkheden voor het vrijkomen van radioactieve stoffen beschreven kunnen worden.
Het falen van een barrière of het falen van een systeem dat essentieel is voor het functioneren van een barrière wordt een 'gebeurtenis' genoemd. Een ongeval bij een kernenergiecentrale wordt gekenmerkt door het falen van een aantal barrières. Op deze wijze is het mogelijk alle ongevallen die potentieel tot het vrijkomen van belangrijke hoeveelheden radioactieve stoffen kunnen leiden en daarmee een belangrijke bijdrage tot het risico leveren te beschrijven als een combinatie van opeenvolgende gebeurtenissen, waardoor identificatie en analyse mogelijk wordt.

b. De hoeveelheid naar de omgeving vrijkomende radioactieve stoffen na een reactorongeval
Voor een berekening van de gevolgen van het vrijkomen van radioactieve stoffen in ongevalssituaties is het niet alleen van belang te weten over welke hoeveelheid radioactiviteit (in curies) het gaat, maar tevens welke radioactieve stoffen er vrijkomen. Van de ongeveer 500 nucliden die bij het splijtingsproces gevormd worden, is een groot gedeelte door hun korte halveringstijd of door de geringe hoeveelheid voor de verdere risico-analyse niet van belang. Daarom wordt een keuze gemaakt van de belangrijkste isotopen. Bij de keuze van deze isotopen wordt rekening gehouden met de hoeveelheid, de halveringstijd, de mate waarin het element kan vrijkomen en zich later eventueel in plant, dier of mens kan concentreren en het soort straling dat bij verval van deze isotopen vrijkomt.

Alle mogelijke combinaties van gebeurtenissen (ongevallen) worden ingedeeld in een aantal lozingscategorieën. Alle ongevallen binnen één lozingscategorie worden dan gekenmerkt doordat de hoeveelheid radioactieve stoffen, de samenstelling van het geloosde isotopenmengsel en het tijdsverloop waarin de lozing plaatsvindt, bij deze ongevallen vrijwel aan elkaar gelijk zijn. Een lozingscategorie is dus de verzameling van ongevallen met dezelfde gevolgen voor de omgeving.
Bij de uitgevoerde risico-analyses blijkt dat ernstige ongevallen hoofdzakelijk optreden wanneer de koeling van de kern van de reactor wegvalt. Na het stoppen van het splijtingsproces blijft in de kern nog een grote hoeveelheid radioactieve stoffen aanwezig. Door de straling hiervan blijft warmteproduktie plaatsvinden, zodat ook lange tijd na het stopzetten van de reactor de reactorkern gekoeld moet worden. Indien de koeling van de kern, om welke reden dan ook, niet kan worden gehandhaafd zal de temperatuur van de splijtstofstaven oplopen, waardoor uiteindelijk de omhulling van de staven en het uraniumoxyde kunnen smelten. Hierbij kan dan een groot gedeelte van de in de splijtstofstaven aanwezige splijtingsprodukten vrijkomen in het reactorvat. De smeltende massa kan ook door de bodem van het reactorvat en het beton van de fundering smelten en in de bodem zakken. In dat geval kan lozing van eventueel nog aanwezige vluchtige radioactieve stoffen optreden na een filtering door de bodem. Als dan alle insluitsystemen falen kunnen de vluchtige radioactieve stoffen ook direct in de atmosfeer terecht komen, waardoor extreem grote lozingen kunnen optreden. Deze processen verlopen niet snel. Gedacht moet worden aan enkele uren tot enkele dagen. Dit betekent dat de zeer kort levende radioactieve stoffen zijn vervallen voordat een lozing plaatsvindt. Ook is het betrekkelijk langzame verloop in de tijd van belang in verband met de alarmering van de omgeving en eventuele evacuatie-acties.
Voor een meer gedetailleerde beschrijving van mogelijke ongevallen kan worden verwezen naar de RASIN-studie (2).

c. De waarschijnlijkheid van het plaatsvinden van deze ongevallen

Ongevallen bij kerncentrales die leiden tot het ongecontroleerd vrijkomen van radioactiviteit dienen te worden gemeld bij de overheid. Op den duur ontstaat zo een hoeveelheid kennis die statistisch kan worden verwerkt. Extreem grote lozingen hebben zich echter, zoals ook te verwachten was, nog niet voorgedaan, zodat er ook geen statistische gegevens voorhanden kunnen zijn. Soms wordt beweerd dat daarom de kans dat een dergelijke onwaarschijnlijke gebeurtenis optreedt niet voldoende bekend kan zijn. Met een eenvoudig voorbeeld is in te zien dat dit niet altijd het geval is. Indien men met een geldstuk kruis of munt gooit is, als de proef eerlijk wordt uitgevoerd, de kans op munt 50%. Indien twee keer kruis of munt gegooid wordt, is de kans dat er twee keer achter elkaar munt gegooid wordt 25% en indien dit twintig keer uitgevoerd wordt is de kans dat men twintig keer achter elkaar munt gooit, $(½)^{20}$ of een kans van 1 op 1.048.576.
Hier gaat het dus om een gebeurtenis (20 × munt gooien) waarmee geen enkele ervaring bestaat, die waarschijnlijk nog nooit heeft plaatsgevonden, maar waarvan de kans nauwkeurig bepaald kan worden. Dit komt doordat deze gebeurtenis opgesplitst kan worden in gebeurtenissen met een grotere kans (één keer munt gooien) die wel bekend is of waarmee wel ervaring bestaat. Dezelfde aanpak vindt in principe plaats bij de analyse van ongevalssituaties bij kernenergiecentrales. Het verloop van het ongeval wordt opgesplitst in gebeurtenissen waarvan de kans bekend of te berekenen is.
De faalkans van een systeem wordt bepaald met behulp van de faalkansstatistiek van frequent gebruikte componenten, zoals bijvoorbeeld pijpleidingen en elektrische componenten. De techniek die daarvoor gebruikt wordt is de zogenaamde 'foutenboom'-analyse. Als de faalkansen van systemen berekend zijn, dan is het

mogelijk om met behulp van gebeurtenissenbomen de kans op een bepaalde combinatie van gebeurtenissen te bepalen. Op deze wijze kan de waarschijnlijkheid van het plaatsvinden van enkele honderdduizenden ongevallen worden bepaald. Deze ongevallen kunnen worden ingedeeld in de hiervoor genoemde lozingscategorieën. Door al de waarschijnlijkheden binnen een lozingscategorie op te tellen is de waarschijnlijkheid van het plaatsvinden van een bepaalde ongevalssituatie bekend. De waarschijnlijkheden worden opgegeven met een schatting van de mogelijke fout. In het Rasmussen-rapport (1) werd hiervoor een factor 3 (zowel groter als kleiner) aangehouden. Latere kritieke beschouwingen komen op een factor 10 (3).

d. De verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen voor de bevolking

Specifiek voor een vestigingsplaats met betrekking tot de gevolgen van ongevallen zijn de meteorologische omstandigheden en de bevolkingsdichtheid in de omgeving. De verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen daarvan voor de bevolking voor alle lozingscategorieën zijn daarom in de RASIN-studie berekend voor de centrale Dodewaard, de centrale Borssele, en ook voor zowel een 1.000 MW(e)-kokendwaterreactor als een 1.000 MW(e)-drukwaterreactor op diverse vestigingsplaatsen. De berekening van de verspreiding van de radioactieve stoffen over de omgeving vindt plaats met modellen, waarin de windrichting, windsnelheid en de stabiliteit van de atmosfeer als variabele gegevens kunnen worden ingevoerd. Voor een bepaalde combinatie van deze variabelen wordt de waarschijnlijkheid bepaald uit statistische gegevens van in de buurt gelegen weerstations. Wanneer voor een bepaalde lozingscategorie met het verspreidingsmodel de concentratie van de radioactieve stoffen in de lucht en op de bodem (ten gevolge van het uitzakken van deeltjes) als functie van de tijd en de plaats is berekend, kan vervolgens de stralingsdosis voor de op die plaatsen aanwezige mensen worden vastgesteld. Met behulp van de bekende bevolkingsdichtheden kan ook een waarde voor de bevolkingsdosis worden bepaald.

De gevolgen van de bestraling kunnen tweeërlei zijn:

- acute effecten (stralingsziekte, bij hoge dosis overlijden binnen ongeveer één maand);
- late effecten (optreden van verschillende vormen van kanker, genetisch bepaalde effecten in het nageslacht).

Met behulp van bekende of aan de veilige kant geschatte relaties tussen de opgelopen dosis en de kans op één van de genoemde effecten kan dan voor de bevolking, die wordt getroffen door straling ten gevolge van een ongeval, de kans op het optreden van een aantal effecten worden berekend. Bij de in dit hoofdstuk genoemde studies is voor de late effecten steeds uitgegaan van een lineaire dosis-effect relatie, waardoor ook bij zeer lage doses een eindig effect optreedt, mits de bevolking voldoende groot is. Deze benadering resulteert naar alle waarschijnlijkheid in een overschatting van de effecten.

Uitgevoerde risico-analyses

De eerste complete risico-analyse voor kernenergiecentrales met lichtwaterreactoren werd uitgevoerd in de Verenigde Staten en is bekend geworden onder de naam 'Rasmussen-rapport' of WASH-1400 (1). In deze studie zijn de risico's berekend van twee Amerikaanse reactoren; het *Peach Bottom Atomic Power Station*, unit II, een kokendwaterreactor van 1.065 MW(e) en het *Surry Power Station*, unit I, een drukwaterreactor van 788 MW(e). De geanalyseerde faalkansen zijn uiteraard afhankelijk van het ontwerp en het bedrijf van deze centrales. De ontwer-

pen van deze eenheden stammen bovendien uit 1966 en zijn daarom niet geheel representatief voor de huidige generatie lichtwaterreactoren.
Ongeveer gelijktijdig met het uitkomen van het concept-rapport van de Rasmussen-studie werd in Nederland begonnen met drie studies, die waren aangekondigd in de Energienota van 1974. Het uitbrengen van de resultaten van deze studies was een van de voorwaarden voor het principe-besluit, over te gaan tot de bouw van drie kernenergiecentrales van ieder 1.000 MW(e). Het betrof de volgende studies:

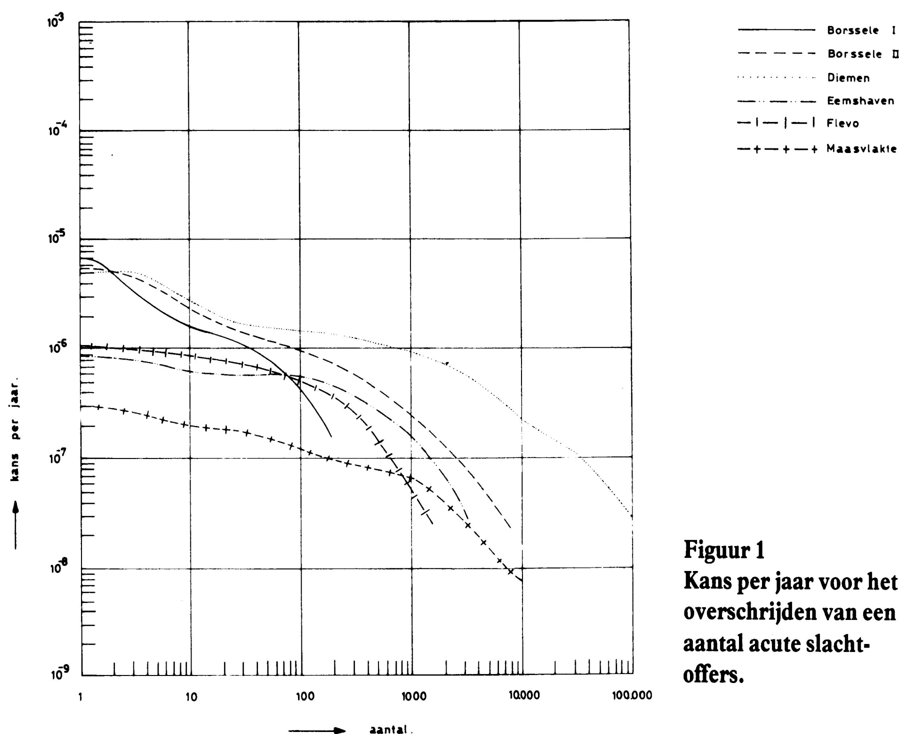
- een complete risico-analyse van alle in Nederland plaatsvindende fasen van de splijtstofcyclus door de belanghebbenden, het RASIN-rapport, uitgebracht door de N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Produktiebedrijven (SEP) (2);
- een rapport over de veiligheidsaspecten van de splijtstofcyclus door de Commissie Reactorveiligheid (4);
- een advies over de invloed van kernenergie op de volksgezondheid en het milieu door de Gezondheidsraad (5).

Bij deze studies is, voor wat betreft de risico-analyses van kernenergiecentrales, gebruik gemaakt van de concept-versie van het Rasmussen-rapport. Tevens zijn veel gegevens en nadere informaties ontvangen van de Amerikaanse instituten die met de Rasmussen-studie bezig waren. In verband met de verschillen tussen de Amerikaanse en Nederlandse omstandigheden, vooral wat betreft bevolkingsdichtheden, mogelijkheden tot evacuatie, e.d., zijn de Amerikaanse resultaten niet zonder meer overgenomen. De berekeningsmethodieken zijn, na kritische evaluatie, overgenomen of aangepast. Het uitbrengen van het Rasmussen-rapport in de Verenigde Staten en de drie hiervoor genoemde rapporten in Nederland heeft veel commentaar en kritieken opgeleverd. Op één van de belangrijkste commentaren, nl. het 'Lewis-rapport' is in een artikel in Energiespectrum in juni 1979 (6) ingegaan. Daarin werd aangetoond dat het onderzoek van de commissie-Lewis geen aanleiding gaf tot wijzigingen in de voornoemde Nederlandse veiligheidsstudies. Op kritiek op het rapport van de Gezondheidsraad, geuit in het 'Boerderij-cahier' (7) ging deze Raad zelf diepgaand in, in een aanvullend advies (8). In dit advies werd duidelijk aangetoond dat genoemde kritiek geen aanleiding gaf om de conclusies van de Gezondheidsraad te herzien of aan te vullen.

De RASIN-studie

Om de nucleaire risico's in ongevalssituaties te berekenen zijn in de RASIN-studie volgens de in WASH-1400 ontwikkelde methodiek de kansen op en de gevolgen van duizenden mogelijke ongevallen voor de kerncentrales Dodewaard en Borssele geanalyseerd. Voor de waarschijnlijkheid van reactorongevallen bij een 1.000 MW(e) kernenergiecentrale zijn de waarden van WASH-1400 genomen.
Specifiek voor een vestigingsplaats met betrekking tot de gevolgen van ongevallen zijn de meteorologische omstandigheden en de bevolkingsdichtheid in de omgeving. De verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen daarvan voor de bevolking voor alle lozingscategorieën zijn daarom in de RASIN-studie berekend voor de centrale Dodewaard, de centrale Borssele, en ook voor zowel een 1.000 MW(e) kokendwaterreactor als een 1.000 MW(e) drukwaterreactor op diverse vestigingsplaatsen. Bij de berekening van ongevalsrisico's blijkt dat alleen ongevallen waarbij de kern smelt kunnen leiden tot ernstige gevolgen voor de bevolking. Bij ongevallen zonder kernsmelting kunnen wel beperkte hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkomen, maar de doses in de omgeving blijven laag. Volgens de berekeningen is de kans op het smelten van de kern voor een 1.000 MW(e) lichtwatercentrale maximaal één keer in de tien- à twintigduizend jaar. De kans dat er dan enkele slachtoffers vallen is nog betrekkelijk gering. De waarschijnlijkheid van smelting van de kern, gevolgd door een zeer grote lozing, terwijl de weerssituatie zodanig is dat er voldoende radioactieve stoffen in de omgeving vrijkomen om tientallen slachtoffers te maken, is minstens twintigmaal lager.

Indien alle mogelijke ongevalssituaties in rekening gebracht worden, vindt men voor een groep van in totaal ongeveer 100.000 personen in de omgeving van een centrale een individuele kans op overlijden ten gevolge van een reactorongeval die kleiner is dan 10^{-7} per jaar. Dit is vergeleken met andere individuele risico's een zeer lage waarde.
Omdat bij een ongeval veel mensen betrokken kunnen zijn heeft het echter meer zin het totale bevolkingsrisico te beschouwen. Dit kan bijvoorbeeld beschreven worden door het totaal aantal acute dodelijke slachtoffers te berekenen of de totale door de bevolking opgelopen stralingsdosis (collectieve dosis). Deze stralingsdosis is bepalend voor effecten zoals kankergezwellen, schildkliergezwellen of genetische effecten. In de RASIN-studie zijn deze gevolgen op velerlei manieren gepresenteerd, o.a. als verwachtingswaarde bij het plaatsvinden van een extreem ongeval of als het risico uitgedrukt als kans × effect. Wat bij dit laatste niet tot uiting komt is dat het voor de beoordeling een groot verschil maakt of er ieder jaar een ongeval plaatsvindt waarbij één slachtoffer valt of elke duizend jaar een ongeval waar duizend slachtoffers vallen. Daar deze laatste situatie als ernstiger ervaren wordt is het zinvol speciaal aandacht te schenken aan ernstige ongevallen.



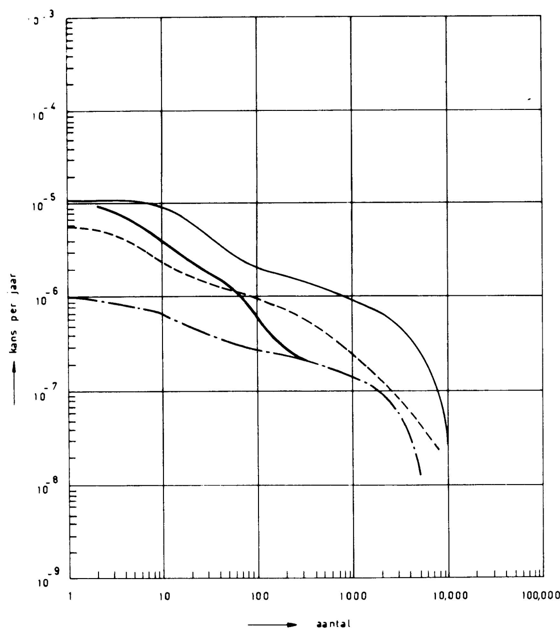
Figuur 1
Kans per jaar voor het overschrijden van een aantal acute slachtoffers.

Voor een totaaloverzicht van de berekende risico's kunnen de gevolgen daarom beter gegeven worden in risico-krommen. Een voorbeeld daarvan is gegeven in figuur 1 uit de RASIN-studie, waarin de kans wordt gegeven dat een ongeval plaatsvindt, waarbij meer dan een gegeven aantal slachtoffers valt. Uit deze figuur blijkt dat volgens de RASIN-berekeningen het maximale aantal acute slachtoffers (afgezien van een vestiging in Diemen) ongeveer 10.000 bedraagt. Voor de bestaande centrale in Borssele (450 MW(e)) was dit aantal ongeveer 140.

Risico-analyses uitgevoerd door de Commissie Reactorveiligheid en de Gezondheidsraad

In WASH-1400 (het Rasmussen-rapport) is een aantal suggesties gegeven om de vei-

ligheid van de twee geanalyseerde reactoren te verhogen. Deze suggesties zijn bij de nieuwere lichtwaterreactoren ook uitgevoerd en daarom heeft de Commissie Reactorveiligheid (CRV) in haar analyse van de waarschijnlijkheid van een extreem ongeval een lagere waarde aangenomen dan in WASH-1400 voor een analoog geval.
In het rapport van de Gezondheidsraad (5) waarin o.a. de gevolgen van een reactorongeval worden bekeken, worden de kernsmeltingsongevallen ingedeeld in drie soorten:
KO = kernsmeltingsongeval, waarbij slechts een geringe lozing van radioactieve stoffen optreedt;
KE = kernsmeltingsongeval, met een extreem grote lozing van radioactieve stoffen; en
KM = kernsmeltingsongeval dat qua omvang tussen een KO en een KE ligt.
De kans op een KO wordt (in het rapport van de Commissie Reactorveiligheid) geschat op 6.10^{-5} per reactorjaar. Bij dit ongeval blijven echter de voorzieningen, die de verspreiding van radioactief materiaal moeten voorkomen, intact. Bij een KO vallen dan ook geen doden en kan men niet spreken van een ramp. Bij een KE is dat wel het geval maar de kans daarop is zestigmaal kleiner.
Tussen de studie van de Gezondheidsraad en de RASIN-studie zijn op veel plaatsen, met name wat betreft de verspreiding van radioactieve stoffen en de gevolgen voor de omgeving, verschillen aan te wijzen. Dit heeft echter niet tot duidelijke verschillen in de resultaten geleid. De enige in het oog lopende verschillen zijn:
- de Gezondheidsraad beschouwde op basis van het CRV-rapport drie soorten kernsmeltingsongevallen en nam voor de waarschijnlijkheid van deze ongevallen de door de CRV geschatte waarden aan, de RASIN-studie gaat voor een drukwaterreactor uit van de negen lozingscategorieën uit WASH-1400;
- de Gezondheidsraad heeft de gevolgen van de drie soorten kernsmeltingsongevallen niet uitgerekend voor bepaalde vestigingsplaatsen, maar voor een 'referentie-vestigingsplaats'. Dat is een denkbeeldige vestigingsplaats, waar binnen een gebied van 1,5 km rond de centrale hoogstens 1.000 mensen wonen, daarbuiten tot op 5 km afstand 200 mensen per km^2 en voor een grotere afstand dan 5 km 400 mensen per km^2. Bovendien is aangenomen dat in twee sectoren van 22,5° in de twee genoemde ringen (van 1,5 tot 5 km en van meer dan 5 km) de bevolkingsdichtheid 500, respectievelijk 1.000 inwoners per km^2 bedraagt. De gevolgen zijn uitgerekend tot een afstand van 800 km van de vestigingsplaats.
Om deze verschillen toe te lichten zijn in figuur 2 enkele risicokrommen samengevat (9). Weergegeven zijn twee risicokrommen, die zijn berekend met het in de RASIN-studie gebruikte rekenprogramma MAKRO. Verder zijn twee risicokrommen weergegeven, die afgeleid zijn uit de studie van de Gezondheidsraad. Voor deze krommen zijn als bronterm gebruikt de lozingscategorie 2 (KE) respectievelijk KE + KM.
Uit figuur 2 is te zien dat de risicokromme voor de referentie-vestigingsplaats ruim boven die van de in de RASIN-studie beschouwde vestigingsplaats ligt (met uitzondering van Diemen). Vergeleken met de referentie-vestigingsplaats kan de plaats Borssele dus duidelijk gunstiger geacht worden. Tevens is te zien dat, voor grotere ongevallen, de kans per jaar voor het overschrijden van het aantal acute slachtoffers in de RASIN-studie ongeveer vijfmaal groter is dan bij de Gezondheidsraad, hetgeen te verwachten was op grond van de vijfmaal grotere kans die in de RASIN-studie voor het KE-ongeval is aangenomen.
In een aanvullend advies van de Gezondheidsraad uit 1978 (8) zijn de bovengenoemde berekeningen nog eens herhaald. Daarbij werd rekening gehouden met de laatste versie van WASH-1400 en met nieuwe inzichten van de Gezondheidsraad zelf. De uitkomsten van deze berekeningen wijken niet wezenlijk af van de hier genoemde. De kans op een extreem ongeval werd in dit advies geschat op 3×10^{-6} per jaar, dus 1,6 maal zo klein als in de RASIN-studie.



Kans per jaar voor het overschrijden van een aantal acute slachtoffers

- ——— referentievestigingsplaats, DWR (berekend met MAKRO)
- ——— referentievestigingsplaats, KE + KM (volgens Gezondheidsraad)
- -·-·- referentievestigingsplaats, alleen KE (volgens Gezondheidsraad)
- – – – Borssele II (berekend met MAKRO)

Figuur 2
Aantal acute slachtoffers ten gevolge van reactorongevallen voor een drukwaterreactor.

Het verloop van een nucleaire ramp

Het maakt een groot verschil of het gebruik van een bepaalde energiedrager elk jaar een bepaald aantal doden tot gevolg heeft of dat bij dat gebruik een kleine kans bestaat op een ongeval met een groot aantal dodelijke slachtoffers. Met name als een dergelijk ongeval de omvang van een ramp aanneemt, is het risico van een dergelijke gebeurtenis moeilijk te vergelijken met de risico's van het normale verloop van het gebruik van energie.
De Gezondheidsraad heeft in haar studie over kerncentrales en volksgezondheid (5) een ramp gedefinieerd als een ongeval waarbij binnen enkele dagen meer dan tien slachtoffers vallen en een extreme ramp als een ongeval waarbij meer dan honderd slachtoffers vallen. Bij een dergelijke omschrijving moet wel bedacht worden dat deze 'definitie' alleen zinvol is als het aantal dodelijke slachtoffers ook bepalend is voor het aanzien van de ramp. Bij het reactorongeval in Harrisburg bijvoorbeeld is geen enkele dode gevallen en valt ook niet te verwachten dat er latente slachtoffers zijn. Het geheel van gebeurtenissen heeft echter zodanige consequenties, met name financiële, dat men misschien niet van een ramp maar toch wel van een groot ongeval kan spreken.
In het vervolg van dit hoofdstuk is de aandacht niet meer gericht op dergelijke ongevallen, maar wordt uitsluitend gekeken naar het verloop en de gevolgen van het ergst denkbare ongeval dat mogelijk is met een kernreactor. In dat geval moet men denken aan een ongeval, waarbij vrijwel alle veiligheidssystemen falen, de reactorkern vrij snel na het begin van het ongeval smelt en de vrijkomende radioactieve stoffen in korte tijd naar de omgeving vrijkomen. Een dergelijk ongeval is de tweede lozingscategorie voor een drukwaterreactor (DWR-2-ongeval), waarvan de belangrijkste karakteristieken hierna worden samengevat.

Karakteristiek van een extreem reactorongeval

In de in dit artikel genoemde studie WASH-1400 zijn van een spectrum van ongevallen en voor enkele honderden mogelijke weerssituaties de gevolgen berekend. Meestal zullen deze gevolgen beperkt zijn maar onder ongunstige omstandigheden kan een extreem reactorongeval plaatsvinden. Dergelijke extreme reactorongevallen zijn bijvoorbeeld de ongevallen uit lozingscategorie 2 van een druk-

waterreactor. Deze ongevallen zijn door de Gezondheidsraad samengevat als een extreem kernsmeltingsongeval (KE). Als dit ongeval plaatsvindt bij ongunstige weersomstandigheden, kunnen ook de gevolgen bijzonder ernstig zijn.
Hieronder volgt een overzicht van de gemaakte veronderstellingen van het reactorongeval, dat in sterke mate bepalend is voor lozingscategorie 2. Bij dit ongeval valt na een storing alle koeling via de stoomgeneratoren uit.

Aanleiding tot het ongeval:
- Als begingebeurtenis van dit ongeval wordt een storing aangenomen, die veroorzaakt wordt door het uitvallen van alle externe elektrische voeding.
- De overgang op het eigen bedrijf, waarbij de centrale zijn eigen elektriciteitsbehoefte verzorgt, mislukt.

Veiligheidssystemen:
- Het noodvoedingwatersysteem faalt.
- De normale elektrische voeding kan niet binnen enkele uren hersteld worden.
- Het insluitsysteem faalt door overdruk. Eventuele systemen voor het begrenzen van de druk falen.

Smelten van de reactorkern.
Na het verdampen van het water in de stoomgeneratoren en in het primaire systeem zal de reactorkern gaan smelten en koken, waarbij vrijwel alle radioactieve stoffen binnen het uitlaatsysteem vrijkomen.

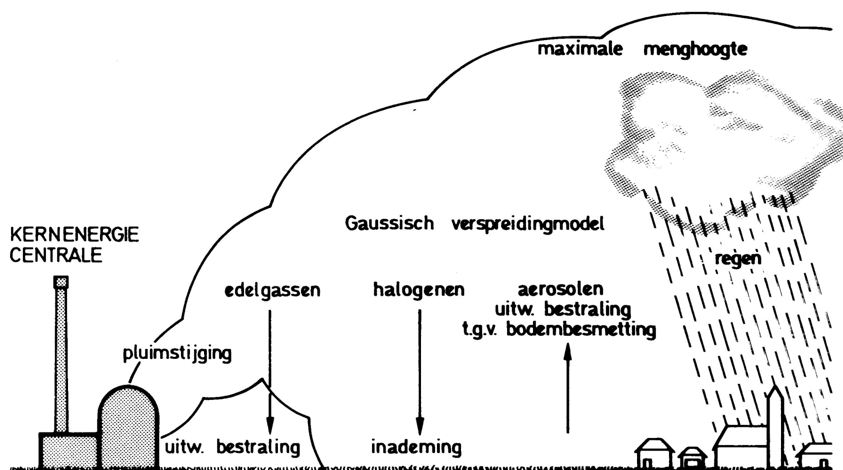
Lozing van radioactieve stoffen.
Doordat verondersteld is dat het insluitsysteem kapot is zullen aanzienlijke hoeveelheden radioactiviteit naar de omgeving worden geloosd. Van de oorspronkelijk in de reactorkern aanwezige hoeveelheid zijn dat de volgende percentages:

edelgassen	90 %
halogenen	70 %
org. gebonden halogenen	0,7%
*CS, Rb**)	50 %
Te, Sb	30 %
Ba, Sr	6 %
Ru, Mo, Rh, Tc, Co	2 %
La, actiniden	0,4%
overige vaste stoffen	0,4%

De lozing van deze stoffen vindt plaats op grondniveau, en duurt tweeënhalf tot drie uur na het begin van de transiënt.
De kans op het smelten van de reactorkern, zonder dat er veel radioactieve stoffen naar buiten komen, wordt geschat op één keer in de 10.000 jaar. De kans op het bovengenoemde extreme ongeval of op een ongeval waarbij vrijwel dezelfde hoeveelheden radioactieve stoffen kunnen vrijkomen, wordt door de Commissie Reactorveiligheid geschat op één keer per miljoen jaar. De kans dat dit ongeval samenvalt met een weerssituatie, waarbij een zeer groot aantal acute slachtoffers valt (meer dan 2.000) bedraagt volgens de Gezondheidsraad ongeveer 10%, zodat de uiteindelijke kans op een dergelijke ramp geschat wordt op ongeveer één keer per tien miljoen jaar.

In de discussie over extreme reactorongevallen ontstaat vaak onzekerheid over het maximum aantal slachtoffers dat bij een reactorongeval kan vallen. Bij de bespreking daarvan gaat men ervan uit dat dit maximum wordt bepaald door wat er in ongevalssituaties fysisch maximaal kan worden geloosd, gecombineerd met de meest ongunstige weerssituatie volgens door het KNMI uitgegeven frequentietabellen van het weer. Zo'n extreme weerssituatie kan bijvoorbeeld gekenmerkt worden door de stabiliteitsklasse F van Pasquill, een inversielaag (dat is de maximale

*) Zie voor de namen van de scheikundige elementen blz. 368.



Figuur 3
Schematisch overzicht van de verspreiding en de berekening van de stralingsdoses na een reactorongeval.

hoogte waarboven geen verspreiding plaatsvindt) van 200 m en een lage windsnelheid (1,25 m per seconde).
De gevolgen heeft men zo goed mogelijk berekend. Bij onzekerheid over de te gebruiken uitgangspunten heeft men er echter altijd naar gestreefd aan de veilige kant te blijven. Deze aanpak, hoe juist ook indertijd, heeft geleid tot een grote overschatting van de gevolgen, met name van de maximale gevolgen.
In de volgende paragraaf wordt voornamelijk gekeken naar het meest extreme ongeval (DWR-2) gecombineerd met de meest ongunstige weerssituatie. Bovendien zal worden ingegaan op enkele belangrijke onderdelen van de berekeningen, waarbij, op grond van nieuwe gegevens, gebleken is dat de hiervóór besproken risico-analyses de gevolgen van dit extreme reactorongeval overschat hebben.

Nieuwe inzichten en berekeningen voor de vestigingsplaatsen Borssele en de Noordoostpolder

In de vorige paragraaf is reeds ter sprake gekomen dat reacties op het WASH-1400 rapport en verschillende studies die de laatste jaren zijn uitgevoerd aanleiding geven tot een bezinning op de resultaten van de Nederlandse veiligheidsstudies. Naar aanleiding van o.a. het Lewis-rapport (3) is het bijvoorbeeld niet onwaarschijnlijk dat de betrouwbaarheidsintervallen van de in WASH-1400 en de RASIN-studie gebruikte kansen groter zijn dan destijds is aangenomen. Veel belangrijker is echter dat de gevolgen van de beschouwde ongevallen, met name die van extreme ongevallen, naar alle waarschijnlijkheid overschat zijn. In deze paragraaf zullen enkele belangrijke onderdelen van de risico-berekeningen ter sprake komen, die aanleiding geven tot een nieuwe schatting van de risico's.
Tenslotte zal gekeken worden naar de gevolgen van een extreem reactorongeval bij een kerncentrale in Borssele of in de Noordoostpolder als we rekening houden met deze nieuwe inzichten.

De hoeveelheid vrijkomende radioactieve stoffen

Van primair belang voor de gevolgen van een reactorongeval is uiteraard de hoeveelheid radioactieve stoffen die uit de splijtstof ontsnapt en uit het insluitsysteem vrijkomt naar de omgeving. In het voorgaande hoofdstuk door Levenson en Rahn,

dat we het EPRI-rapport zullen noemen (10), wordt gesteld dat deze hoeveelheden in WASH-1400 veel te groot geschat zijn en dat de gevolgen zeker overschat zijn.
In een rapport van de *Nuclear Regulatory Commission* NRC (NUREG-0172) (11), dat dit voorjaar verscheen, is diep ingegaan op de beweringen van het EPRI-rapport om deze op hun waarde te toetsen. Een reeks kernsmeltongevallen voor zowel druk- als kokendwaterreactoren werd geanalyseerd om na te gaan of de in WASH-1400 gebruikte bronterm inderdaad veel te conservatief was. De conclusies zijn aanzienlijk genuanceerder dan die in het EPRI-rapport. Erkend wordt dat natuurlijke processen, zoals chemische reacties, depositie van aerosolen, neerslag van deeltjes etc. onvermijdelijk zijn en dat in WASH-1400 met deze processen onvoldoende rekening is gehouden. De belangrijkste conclusie van het NUREG-rapport is echter dat er voor al deze processen veel meer studie nodig is en veel gedetailleerder naar het verloop van specifieke ongevallen gekeken moet worden voordat er definitieve conclusies getrokken mogen worden.
Op grond van deze EPRI-studie en het rapport van de NRC mag worden aangenomen dat in het verleden voor veel ongevalsreeksen de bronterm inderdaad overschat is. Ruwweg kan daarbij gedacht worden aan een minimaal tienmaal te hoge raming voor alle niet-edelgassen. Voor enkele extreme ongevalssituaties is dat misschien niet het geval. Met name die, waarin de reactorkern in korte tijd smelt en de verblijfstijd van de radioactieve stoffen in het insluitsysteem te kort is om de geclaimde neerslag en vangst in alle gevallen te doen plaatsvinden. Dat betekent dat op dit moment niet met zekerheid geconcludeerd mag worden dat voor alle ongevalsreeksen uit de lozingscategorie 2 voor drukwaterreactoren (DWR 2) de in WASH-1400 en in de Nederlandse risico-analyses gebruikte bronterm te hoog is. Wel blijkt uit enkele recente studies (12) dat de kans op dergelijke ongevallen veel kleiner is dan tot nu toe werd aangenomen.

De lozingsduur

Bij de berekening van de verspreiding in de omgeving wordt aangenomen dat gedurende de lozing en gedurende de verspreiding de windrichting, de windsnelheid en de weerssituatie constant blijven.
Bij een kortdurende lozing zouden de berekende concentraties nog kunnen gelden, maar dan in een volgens het windveld gekromd patroon. Als echter tijdens de lozing de windrichting verandert dan zullen de maximale concentraties van radioactieve stoffen ook lager zijn. Bij het DWR-2-ongeval is verondersteld dat de lozingsduur een half uur bedraagt. Het is echter een nog onbeantwoorde vraag of het fysisch wel mogelijk is dat ook al falen alle veiligheidssystemen in zo'n korte tijd vrijwel de gehele reactorkern als aerosol naar buiten komt. Het is veel waarschijnlijker dat, ook in de meest ernstige ongevalssituaties, de lozing later plaatsvindt, de lozingsduur veel langer is dan een half uur en dat daardoor de bronterm kleiner is dan verondersteld bij het DWR-2-ongeval. Voor een 1.000 MW(e) centrale in Borssele bijvoorbeeld zou, ook bij een gelijkblijvende bronterm een lozingsduur van vijf uur in plaats van een half uur maken dat het aantal acute slachtoffers meer dan tienmaal kleiner zou zijn. De collectieve lichaamsdosis zou relatief weinig veranderen.

Pluimstijging

Een uiterst belangrijke vraag bij verspreidingsmodellen is of de pluim al of niet van de grond opstijgt. In het in de RASIN-studie gebruikte rekenprogramma MAKRO wordt bij de berekening van de gevolgen van een DWR-2-ongeval verondersteld dat de pluim niet loskomt van de grond. Deze aanpak is aan de veilige kant, maar kan tot een sterke overschatting van de effecten leiden.
Het al of niet opstijgen hangt behalve van de wijze van vrijkomen en de windsnelheid voornamelijk af van de warmte-inhoud van de vrijkomende wolk. Uit expe-

rimenten (bijvoorbeeld van het Warren Spring Laboratorium) is gebleken dat het vermogen van de wolk zo'n 10 à 100 MW moet bedragen om werkelijk los te laten van de grond. Daarbij moet niet gedacht worden aan de vervalwarmte maar meer aan de initiële warmte-inhoud van de wolk die gedurende de lozing vrijkomt. In veel gevallen zal na een reactorongeval dit loslaten van de grond nauwelijks of slechts gedeeltelijk plaatsvinden. Bij de meest extreme ongevallen waarbij veel energie in korte tijd vrijkomt zal dat wel het geval zijn.
Bij een DWR-2-ongeval bedraagt het vermogen gedurende de lozingsduur van een half uur ongeveer 150 MW en mag worden aangenomen dat de pluim van de grond loslaat en in korte tijd zal stijgen naar een hoogte van enkele honderden meters.

Dosisconstanten en dosis-effect-relaties

Nadat bepaald is hoe de radioactieve gassen en stoffen zich verspreiden in de omgeving zijn voor de berekening van de effecten twee gegevens van belang, de dosisconstanten en de dosis-effect-relaties. De dosisconstanten geven voor iedere nuclide en voor de belangrijkste organen (beenmerg, long, maagdarmkanaal, schildklier etc.) aan welke doses veroorzaakt worden door een concentratie aan radioactieve stoffen in de omgeving, in de ingeademde lucht of op de grond. De zo berekende doses worden per nuclide uitgerekend. Daarna worden de gevolgen bepaald met behulp van dosis-effect-relaties.
Sinds de voor het RASIN-rapport uitgevoerde berekeningen zijn de dosisconstanten belangrijk gewijzigd. Bij de huidige berekeningen worden in het algemeen de dosisconstanten en de dosis-effect-relaties uit de laatste versie van WASH-1400 gebruikt, tenzij de Gezondheidsraad duidelijk van deze waarden afwijkt. Dat is bijvoorbeeld het geval voor de dosis waarbij 50% kans op overlijden bestaat (gewoonlijk aangeduid als letale dosis of LD 50). In WASH-1400 wordt een onderscheid gemaakt tussen de stralingsziektegevallen die geen, wel of zeer intensieve medische behandeling ondergaan. Door de Gezondheidsraad wordt bij een extreem reactorongeval een ondersteuningstherapie onwaarschijnlijk geacht en ze gebruikt bij haar berekeningen een LD 50 van 350 rem. (Lineair verloop van 250 tot 450 rem.) Deze dosis-effect-relatie wordt ook in de RASIN-studie gebruikt.
Wanneer de berekeningen uit de RASIN-studie herhaald worden met de nieuwe dosisconstanten en dosis-effect-relaties, dan blijken de gevolgen in het algemeen af te nemen. Dit is echter sterk afhankelijk van de vestigingsplaats. Voor een 1.000 MW(e) centrale in Borssele wordt het aantal acute slachtoffers bij het meest extreme reactorongeval tienmaal kleiner en de collectieve lichaamsdosis vijfmaal.

Beschermende maatregelen

De gevolgen van een eventueel reactorongeval voor de bevolking in de omgeving van die reactor zal in sterke mate afhangen van de beschermende maatregelen die dan genomen zullen worden. In de berekeningen wordt er doorgaans van uitgegaan dat eventueel besmette groente of melk bewaard of vernietigd zal worden en dat sterk besmette gebieden tijdelijk verlaten zullen worden. Bij dit laatste kan, alleen voor een extreem ongeval, gedacht worden aan een gebied van enkele tientallen vierkante kilometers in de omgeving van de centrale. Dergelijke beslissingen zullen genomen moeten worden op grond van de gemeten besmetting van de grond en voor de besluitvorming is tijd nodig maar ook beschikbaar. Voor andere maatregelen is men veel meer afhankelijk van het bestaan van een alarmregeling waarin acties, die snel uitgevoerd moeten worden, geregeld zijn.
Gedacht kan worden aan maatregelen zoals bijvoorbeeld een snelle evacuatie, een vergroting van de afscherming tegen ioniserende straling door binnenshuis te blijven, een vermindering van de ingeademde radioactiviteit door het sluiten van deuren en ramen of het filtreren van de ingeademde lucht.

In WASH-1400 is gebruik gemaakt van een ingewikkeld model van de uit te voeren evacuatie, dat echter alleen voor Amerikaanse omstandigheden van toepassing is. In de RASIN-studie werd uitgegaan van een beperkte evacuatie tot 5 km afstand van de centrale. De Gezondheidsraad veronderstelde alleen evacuatie binnen een straal van 1,5 km. Bij de verder in dit artikel gerapporteerde berekeningen met het programma MAKRO is slechts evacuatie binnen een straal van 1 km in aanmerking genomen.
In het rapport van de Gezondheidsraad is als afschermingsfactor voor alle mensen 1/3 aangehouden. Voor mensen die tijdens het overtrekken van de radioactieve gaswolk buiten vertoeven is dit een duidelijke onderschatting van de dosis. Voor mensen in stenen gebouwen of huizen kan de afscherming groter zijn. Om enige differentiatie mogelijk te maken worden in het in de RASIN-studie gebruikte rekenprogramma MAKRO de mensen ingedeeld in vier verschillende groepen met verschillende afschermingsfactoren, voor de uitwendige bestraling (afkomstig uit de pluim of van de bodem) en de inwendige bestraling (afkomstig van de ingeademde radioactieve stoffen) (zie tabel II).

Tabel II. Afschermingsfactoren naar verblijfplaats.

Verblijfplaats	Fractie van de bevolking	Afschermingsfactoren t.g.v. de straling van		
		de lucht	de bodem	inademing
Buiten	0,05	1,0	0,5	1
In voertuigen	0,05	0,67	0,33	1
In huizen	0,70	0,20	0,10	1
In grote gebouwen of kelders	0,20	0,10	0,05	1

Toepassing van deze factoren geeft een gemiddelde afscherming van 0,24 voor uitwendige bestraling door de pluim. Voor effecten met een drempelwaarde, zoals bijvoorbeeld de dosis-effect-relatie voor het overlijden aan een acute beenmergdosis is het gebruik van een dergelijke gemiddelde afscherming niet juist. Het aantal slachtoffers wordt dan te laag geschat. Het gebruik van bovengenoemde afschermingsfactoren bij de berekening van het aantal acute slachtoffers na een extreem reactorongeval zal naar alle waarschijnlijkheid een overschatting opleveren. Een extreem ongeval kenmerkt zich immers door het vrijkomen van een maximale hoeveelheid radioactiviteit, gecombineerd met een weerssituatie die die activiteit zo geconcentreerd mogelijk naar verstedelijkte gebieden voert. Juist in grote steden zal de afscherming een stuk groter zijn. In het algemeen zou men kunnen stellen dat hoe groter het aantal mensen is, des te beter ook de bescherming is.
In een recente studie van het *Risö National Laboratory* over de gevolgen van een ongeval met de Barsebäck-centrale werden, op grond van experimenten en berekeningen, afschermingsfactoren gebruikt die veel lager waren dan de in de RASIN-studie gebruikte. Voor Kopenhagen werd de gemiddelde afscherming voor uitwendige bestraling door de pluim berekend op 0,0075; voor de voorsteden op 0,067 en voor de dorpen op 0,09. Het is zeker dat ook zonder het nemen van welke maatregel dan ook de tot nu toe gebruikte afschermingsfactoren aan de veilige kant waren. Zodra men in dit soort berekeningen rekening zou kunnen gaan houden met een alarmregeling, kan men er van uitgaan dat de gewaarschuwde bevolking tijdens het overtrekken van de pluim binnenshuis blijft, de ventilatie afsluit etc. Door dergelijke maatregelen kan het aantal acute slachtoffers of de collectieve lichaamsdosis zeker tienmaal lager worden.

Nieuwe berekeningen voor de vestigingsplaatsen Borssele en de Noordoostpolder

De maximale gevolgen van een ongeval bij een kerncentrale worden bepaald door wat er in ongevalssituaties fysisch maximaal geloosd kan worden, gecombineerd met de meest ongunstige weerssituatie. In het voorafgaande zijn enkele onderwerpen besproken die leiden tot de verwachting dat deze maximale gevolgen minder zullen zijn dan vroeger op grond van Nederlandse veiligheidsstudies verwacht werd. Genoemd zijn de gewijzigde dosisconstanten, de kleinere bronterm, de langere lozingsduur, de stijging van de pluim en de beschermende maatregelen op grond van een alarmregeling.

Het is natuurlijk de vraag welke zekerheid men heeft dat deze wijzigingen terecht in de berekeningen worden doorgevoerd. Van de dosisconstanten ligt dat voor de hand. Met de op experimentele gegevens berustende aanpassingen van dosisconstanten en dosis-effect-relaties, die algemeen geaccepteerd worden in de vakliteratuur moet wel rekening worden gehouden. De door het EPRI verdedigde stelling dat de bronterm veel lager is dan tot nu toe is aangenomen lijkt echter niet zonder meer in alle gevallen juist. Wel mag men een kleinere bronterm verwachten in al die gevallen waarbij de lozing niet direct plaatsvindt; niet direct in die zin dat er een tijdsvertraging (uren) plaatsvindt of dat de aerosolen alleen via diverse ruimten, gangen pijpen of spleten naar buiten kunnen komen. Ook bij een ongeval waarbij veel water en stoom vrijkomt is een reductie van de bronterm waarschijnlijk.

Het is echter nog niet met zekerheid aangetoond dat er enkele ongevalsreeksen zouden zijn waarbij een groot gedeelte van de reactorkern in korte tijd buiten het insluitsysteem vrijkomt. Bij een dergelijk ongeval zal de energie die met de vrijkomende radioactieve stoffen vrijkomt echter zo groot zijn, dat de ontsnappende hete wolk niet op grondniveau zal blijven maar onmiddellijk zal opstijgen.

Het lijkt op dit moment niet mogelijk om met zekerheid een nieuwe bronterm of een pluimstijging te claimen. Een berekening waarbij van beide effecten wordt afgezien is echter niet realistisch. Deze redenering is schematisch weergegeven in figuur 4, waarin de resultaten van enkele berekeningen voor een extreem ongeval van een 1.000 MW(E) centrale in Borssele zijn aangegeven. Bij de nieuwe bronterm is gerekend met een verlaging van tienmaal voor alle niet-edelgassen ten opzichte van de in WASH-1400 gebruikte bronterm. Om deze figuur eenvoudig te houden is afgezien van het in rekening brengen van de andere behandelde effecten, zoals een langere lozingsduur of beschermende maatregelen.

Figuur 4
Gebeurtenissenboom van een extreem reactorongeval.

Berekening gecorrigeerd voor:				Effecten	
RASIN-studie	Dosisconstanten	Bronterm	Pluimstijging	Aantal acute slachtoffers	Bevolkingsdosis in 1.000 manrem
				8900	27000
				1070	6100
				21	6200
JA				17	710
				0	720

Figuur 5
Kans per jaar voor het overschrijden van een aantal acute slachtoffers ten gevolge van een extreem reactorongeval.

Figuur 6
Kans per jaar voor het overschrijden van een bevolkingsdosis ten gevolge van een extreem reactorongeval.

In figuur 5 is voor deze berekeningen de overschrijdingskans van een aantal acute slachtoffers gegeven. Bovendien zijn de twee 'reële' berekeningen ook uitgevoerd voor een kerncentrale in de Noordoostpolder. De Rotterdamse Hoek in de Noordoostpolder wordt, evenals Borssele in de nota Energiebeleid, deel 3 (13), hoofdstuk 13, genoemd als een vestigingsplaats die eventueel geschikt is voor de bouw van kernenergiecentrales.
Dezelfde risicokrommen van de collectieve lichaamsdosis zijn afgebeeld in figuur 6. Uit deze en andere parameterstudies blijkt dat bij een extreem reactorongeval bij de genoemde vestigingsplaatsen, gecombineerd met een extreem ongunstige weerssituatie, niet meer dan enkele tientallen acute slachtoffers kunnen vallen. Als we ons afvragen in welke mate een dergelijk ongeval ervaren zal worden als een ramp moeten we naar die effecten kijken die aan een dergelijk ongeval het aanzien van een ramp geven. Dat zijn met name effecten die direct ervaren worden, zoals acute doden, acute ziektegevallen en eventuele evacuatie in de omgeving van de centrale. Voor vertraagde of late effecten is dat echter niet het geval.
Uit figuur 6 blijkt dat de collectieve lichaamsdosis ook zonder extra beschermende maatregelen nooit meer dan ongeveer 6 miljoen manrem kan bedragen. Een dergelijke stralingsbelasting zal een verhoogde sterfte aan kanker veroorzaken van ongeveer twintig gevallen per jaar gedurende een risico-periode van vijftig jaar. De natuurlijke sterfte aan kanker in de desbetreffende bevolkingsgroep van ongeveer 5 miljoen mensen ligt in de orde van 10.000 per jaar.
Soortgelijke berekeningen voor de bestaande centrales Dodewaard en Borssele wijzen erop dat ongevallen, waarbij acute slachtoffers in de omgeving zouden vallen uitgesloten mogen worden. Ook de maximale stralingsdoses zijn (minstens evenredig met het reactorvermogen) veel geringer dan bij een 1.000 MW(e) centrale.

Conclusies

Een 'extreme ramp' met een kernenergiecentrale in Nederland zal nooit meer dan enkele tientallen directe slachtoffers kunnen veroorzaken. Het aantal mensen dat als gevolg van de opgelopen straling veel later komt te overlijden bedraagt bij zo'n extreem ongeval dat naar menselijke maatstaven nooit plaats zal vinden eveneens enkele tientallen per jaar. De maximale gevolgen van een eventuele ramp met een kernenergiecentrale zijn daarom waarschijnlijk niet groter dan die van bijvoorbeeld het gebruik van aardgas of olie. Wel komt bij de berekeningen aan reactorongevallen het belang naar voren voor een goede alarmregeling. Een alarmregeling waarbij rekening gehouden wordt met de nieuwste inzichten in het verloop van reactorongevallen zal vooral de niet-directe gevolgen in belangrijke mate kunnen verminderen.
Het ligt voor de hand het risico van kerncentrales te vergelijken met de risico's die optreden als er geen kerncentrales worden gebouwd maar met alternatieven wordt gewerkt. Een duidelijk hiaat bij de risico-evaluatie van het gebruik van uranium is de onbekendheid met de risico's die een drastische vermindering van het gebruik van energie of elektriciteit met zich meebrengt voor onze maatschappij. Risicokrommen voor de elektriciteitsproduktie met gas, olie of kolen zijn, op een enkele uitzondering na, nog niet berekend of gepubliceerd, zodat een goede vergelijking met kernenergie nu nog niet mogelijk is. Grote problemen bij dergelijke vergelijkingen zijn o.a. de onbekendheid met concentratie-effect-relaties van chemische produkten en de milieuverstoringen op langere termijn bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Een vergelijking wordt voorts bemoeilijkt doordat bij de kernenergie ongelukken alleen lokaal kunnen ontstaan bij kernenergiecentrales of eventueel opwerkingsfabrieken, terwijl bij het gebruik van bijvoorbeeld olie of kolen eventuele rampen eerder zullen ontstaan bij winning, opslag of transport.

Referenties

(1) *Reactor Safety Study.* An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants. USAEC, WASH-1400 D, August 1974. WASH-1400, October 1975.

(2) *Risico-analyse van de Splijtstofcyclus in Nederland.* NV Samenwerkende Elektriciteits Produktiebedrijven, Arnhem 1975.

(3) *Risk Assessment Review Group Report to the US Nuclear Regulatory Commission.* NUREG/CR-040, Washington DC, September 1978.

(4) *Advies over de Veiligheidsaspecten van de Splijtstofcyclus in Nederland.* Commissie Reactorveiligheid, Voorburg 1975.

(5) *Kerncentrales en Volksgezondheid.* Gezondheidsraad, Rijswijk 1975.

(6) B.Th. Eendebak en R.W. van Otterloo, Nieuwe Evaluatie Rasmussen-Rapport en de Nederlandse Veiligheidsstudies. *Energiespectrum,* 1979.

(7) Kernenergie in Discussie. *Boerderijcahier 7502* (BC I), Technische Hogeschool Twente, december 1975.
Kleine Kansen – Grote Gevolgen. *Boerderijcahier 7601* (BC II), Technische Hogeschool Twente, 1977.

(8) *Aanvullend Advies inzake Kerncentrales en Volksgezondheid.* Gezondheidsraad, Rijswijk 1978.

(9) *Toekomstige Energie-Situatie in Nederland.* VDEN, Arnhem 1980.

(10) M. Levenson and F. Rahn, Realistic Estimates of the Consequences of Nuclear Accidents. *Nuclear Technology,* 53; May 1981.

(11) *Technical Bases for Estimating Fission Product Behaviour During LWR Accidents.* Nuclear Regulatory Committee, NUREG-772, March 1981.

(12) *Steam Explosions in Light Water Reactors.* Ministry of Industry, DSI 1981:3. Departementens Offset Central, Stockholm 1981.

(13) *Nota Energiebeleid,* deel 3, Brandstofinzet Centrales. Tweede Kamer, Zitting 1979-1980, 15802, nrs. 11 en 12.

21. HET RISICO VAN KERNENERGIE, GEZIEN DOOR DE BRIL VAN GEWONE BURGERS

W.A. Wagenaar

Er bestaan grote verschillen tussen berekend en waargenomen risico. Een verwachte frequentie van duizend ongelukken per jaar levert bij een ongeluksomvang van één mensenleven een verwacht verlies van duizend mensenlevens per jaar. Een precies even groot verwacht verlies kan worden verkregen uit één ongeluk per jaar met een omvang van duizend mensenlevens. Toch wordt zo'n catastrofe als veel ernstiger ervaren dan een chronische serie kleine ongelukken. Het 'objectieve' risico is dus niet bepalend voor onze subjectieve beleving; sterker nog: bij nader inzien blijkt ook 'objectief' of 'berekend' risico het produkt te zijn van subjectieve schattingen. Er is dus geen reden om berekend risico maatgevender te achten dan 'waargenomen', 'subjectief' risico. De implementatie van een nieuwe technologie als kernenergie kan alleen plaatsvinden wanneer het waargenomen risico binnen aanvaardbare grenzen is gelegen. Om dat te bereiken dient men aandacht te schenken aan de omvang van de ergst denkbare ramp – in vorige hoofdstukken is aangetoond dat die zich beperkt tot enkele tientallen mensenlevens – en aan de waargenomen voordelen van kernenergie.

Iedere nieuwe technologie brengt een zekere mate van moeilijk te schatten risico met zich mee. Naarmate de gevolgen van ongelukken veelomvattender worden neemt de noodzaak van een risico-analyse vóór de invoering van die technologie toe. Daarbij doen zich echter drie problemen voor: hoe maken we een volledige inventarisatie van mogelijke ongelukken; hoe vergelijken we verschillende risico's en op basis van welk criterium kiezen we voor of tegen de implementatie? Het eerste probleem is uitvoerig bestudeerd aan de hand van ervaringen met foutenboomanalyses (1). De belangrijkste conclusie is dat experts vaak voorbij zien aan belangrijke oorzaken van ongelukken, waardoor de risicoschattingen te laag uitkomen. Deze bijdrage gaat echter over het tweede en derde probleem: hoe kwantificeren we risico zodanig dat verschillende risico's tegen elkaar kunnen worden afgewogen, en wat is een redelijk criterium voor de aanvaarding van risico?

Berekend en waargenomen risico

Een eenvoudige manier om risico te kwantificeren is door het uit te drukken in termen van het verwachte aantal verloren mensenlevens per jaar. Veel risicoberekeningen op grond van foutenboomanalyses maken gebruik van deze 'mensenlevensdimensie'. De moeilijkheid daarbij is echter dat twee gelijke 'berekende' risico's op geheel verschillende wijze tot stand kunnen komen. Een geschatte ongeluksfrequentie van duizend per jaar en een ongeluksomvang van één mensenleven levert een verwacht verlies van duizend mensenlevens per jaar. Zulk soort ongevallen kennen we bij het wegtransport, het gebruik van keukentrapjes en het baren van kinderen. Hetzelfde verwachte verlies kan ook worden bereikt door éénmaal per jaar een grote ramp waarbij duizend mensen omkomen. De overstroming van 1953, het vergaan van de Titanic en een (nog niet voorgekomen) grote ramp in een

kerncentrale zijn van dit type. Catastrofes spreken het publiek veel meer aan dan regelmatig terugkerende kleine ongelukken; de overheid is ook veel meer bereid te investeren in het voorkómen van rampen dan in het voorkómen van hoogfrequente kleine ongelukken. Vergelijk bijvoorbeeld de investeringen in de Deltawerken en de bestrijding van alcoholmisbruik. De nieuwsmedia conformeren zich aan deze accentverschuiving, omdat grote ongelukken nu eenmaal meer nieuwswaarde hebben dan kleine. Dit is een van de redenen dat de ernst van kleine ongelukken vaak wordt onderschat. Roken en alcoholgebruik veroorzaken bij elkaar viermaal zoveel doden als wegverkeer, railverkeer, vliegen, operatieve geneeskunde, gebruik van verkeerde medicijnen, misdaad, terrorisme, brand en blootstelling aan gevaarlijke chemische stoffen bij elkaar; weinigen realiseren zich dat. Verwacht verlies, berekend uit een eenvoudige vermenigvuldiging van kans en effect, is dus niet maatgevend voor risico in de ogen van het publiek, en ook niet voor de investeringen die een overheid wil doen om verlies te voorkomen. Daarmee is verwacht verlies ook gediskwalificeerd als grootheid voor het vergelijken en beoordelen van risico's.

De lezer zou, op dit punt aangekomen, het gevoel kunnen krijgen dat via een psychologische truc het nut van de objectieve risicoberekening te gemakkelijk in een kwaad daglicht wordt gesteld. Het antwoord daarop is dat objectieve berekening van risico niet eens mogelijk is. De kansen op ongelukken kunnen niet worden geput uit statistische overzichten omdat deze, zo ze al bestaan, slechts het verleden beschrijven. Hoe moeten we bijvoorbeeld denken over de kans dat een kerncentrale wordt gesaboteerd of gebombardeerd? Zulke kansen kunnen alleen worden verkregen uit schattingen van experts, die hun subjectieve verwachting over het vóórkomen van gebeurtenissen uitdrukken in een getal tussen nul en een. Zeker ten aanzien van nieuwe technologieën, waarvan de risico's op lange termijn moeten worden geschat, zijn kansen niets anders dan subjectieve waarschijnlijkheden. Het effect van ongelukken valt evenmin op objectieve wijze te kwantificeren. Het aantal gevallen waarin een nieuwe technologie is geïntroduceerd zonder dat men wist hoe vèrstrekkend mogelijke ongelukken zouden zijn is legio. Daarom is ook de schatting van effect een subjectief gegeven.

Het door sommigen als 'objectief' gehanteerde risicobegrip blijkt dus bij nader inzien een produkt te zijn van twee subjectieve schattingen. Daarom kan er niets tegen zijn om risico direct te laten schatten door beoordelaars, in plaats van de componenten kans en effect. Het op die manier verkregen 'waargenomen' of 'subjectieve' risico is niet subjectiever dan de berekening van kans maal effect. Behalve dat er niets tegen is, is er ook een heleboel vóór. Het voornaamste voordeel is wel dat waargenomen risico's van verschillende technologieën en van activiteiten in de praktijk veel beter vergelijkbaar zijn dan berekende risico's. Het berekende risico van roken is in de Verenigde Staten minstens 1.500 maal groter dan de somberste schatting van het risico van kernenergie; toch staat bij de waargenomen risico's kernenergie op de eerste plaats en roken pas op de vierde (2). De rangorde van waargenomen risico is veel beter in overeenstemming te brengen met menselijk gedrag; denk bijvoorbeeld aan het paradoxale televisiebeeld van gezellig rokende actievoerders bij Dodewaard. Dus: berekend en waargenomen risico zijn beide subjectief. Alleen waargenomen risico is bepalend voor het gedrag van burgers en overheden. Daarom is een kwantificering van waargenomen risico de enige grond waarop risico's kunnen worden beoordeeld en vergeleken.

Waardoor wordt waargenomen risico bepaald?

De correlatie tussen geregistreerd verlies aan mensenlevens en door burgers waargenomen risico is niet groter dan 0,54%. Deze afwijking is niet veroorzaakt door

een foutieve waarneming van het aantal ongelukken; de correlatie tussen subjectief geschat verlies aan mensenlevens en waargenomen risico is ook niet groter dan 0,60%. Dit betekent dat het waargenomen risico voor ruwweg 70% op andere factoren berust. Of anders gezegd: verlies aan mensenlevens is op zich zelf geen goede voorspeller voor waargenomen risico. Wanneer ontwerpers berekenen dat een nieuwe technologie weinig risico met zich mee brengt, is het goed mogelijk dat er toch diverse actiegroepen in het geweer komen die het risico totaal anders aanvoelen. Welke aspecten van riskante activiteiten bepalen dan nog meer het waargenomen risico? In een uitgebreid Nederlands onderzoek (3) was deze vraag aan de orde. In een van de deelonderzoeken (taak 4) werd aan 456 beoordelaars gevraagd 26 activiteiten in rangorde te plaatsen naar risico-ernst. Uit de verschillen tussen de individuele rangordeningen kon worden afgeleid welke dimensies ten grondslag lagen aan de beoordelingen. De statistische procedure die hiervoor wordt gebruikt noemt men principale componentenanalyse (4). De oordelen over risico-ernst bleken te berusten op twee onderliggende onafhankelijke dimensies. De eerste daarvan was de *ongevalsomvang*. Aan het ene uiteinde vindt men hier het verplicht immuniseren en autorijden (kleine ongevallen); aan het andere uiteinde staan het in gebruik nemen van een kerncentrale, het bouwen van een woonwijk vlakbij een raffinaderij en het opslaan van LPG in benzinestations. De tweede onderliggende dimensie was gerelateerd aan de *mate van maatschappelijke beveiliging*. De extremen waren het opzetten van een nationaal computersysteem met persoonlijke gegevens (zeer beveiligd) en het in bed roken voor het slapen gaan (niet beveiligd). De resultaten lieten verder zien dat niet alle beoordelaars evenveel gewicht aan beide dimensies toekennen. De meerderheid hecht veel belang aan de omvangsdimensie (±90%), maar over het belang van maatschappelijke beveiliging is men het niet eens. Ongeveer 50% van de beoordelaars meent dat een grote mate van maatschappelijke beveiliging leidt tot verkleining van risico; zij geloven in Vadertje Staat. Evenveel mensen vinden echter dat maatschappelijke beveiliging het risico nog vergroot; dit argument vindt men terug in de angst voor de Atoomstaat. Uit dit gegeven kunnen we concluderen dat waargenomen risico sterk persoonsgebonden is; veel hangt er van af hoe men de onderliggende dimensies weegt. Een algemene rangordening van technologieën naar risico-ernst bestaat dus niet. Een directe consequentie van het voorgaande is dat verschil van mening over de aanvaarding van risico zal blijven bestaan zelfs bij een volledige bekendheid met alle aspecten van die technologie. Niet de feiten zijn bepalend, maar de weging van feiten. Voorlichtingsprogramma's hebben juist ten aanzien van risicoperceptie maar een zeer beperkt effect.

In een vergelijkbaar onderzoek over 90 riskante activiteiten concluderen Slovic, Fishhoff en Lichtenstein (2) eveneens tot tenminste twee onderliggende dimensies. Wederom houdt de eerste dimensie verband met ongeluksomvang, met op de extremen aan de ene kant kernenergie, strijdgassen, terrorisme en kernwapens; aan de andere kant de fiets, haarverf, kerstboomverlichting en marijuana. Daarnaast geven de auteurs ook een uitgebreide analyse van andere factoren die meespelen bij de beoordeling van risico's. Om er enige te noemen: de mate van vrijheid die men heeft bij het aangaan van risico; de fataliteit, dat is de zekerheid dat een ongeluk de dood ten gevolge heeft; de tijdsspanne waarover uitgestelde effecten van een ongeluk verwacht kunnen worden; de mate van bekendheid met de riskante activiteit. Met enige goede wil kunnen deze factoren worden gegroepeerd in de hoofddimensies ongeluksomvang en controleerbaarheid. Om echter een duidelijk beeld te geven van de ongunstige positie die kernenergie inneemt in de ogen van het publiek is in tabel I een vergelijking gemaakt van beoordelingen van conventionele en nucleaire energieopwekking naar negen dimensies. Hieruit blijkt kernenergie steeds een stuk verschoven te zijn naar de kant die het risico in de ogen van het publiek vergroot. Kernenergie wordt niet als riskant beoordeeld vanwege de

Tabel I. De subjectieve beoordeling van conventionele en nucleaire energieopwekking naar negen dimensies die van belang zijn bij de beoordeling van risico.

	Conventionele centrale	Nucleaire centrale
Hoofdgroep: omvang		
1 = frequente kleine ongelukken 7 = zeldzame grote ongelukken	2,5	6,4
1 = zeker niet fataal 7 = zeker fataal	4,4	6,1
1 = kortdurend effect 7 = langdurig effect	2,9	5,0
Hoofdgroep: controleerbaarheid		
1 = vrijwillig 7 = onvrijwillig	4,2	6,6
1 = niet verontrustend 7 = angstaanjagend	1,7	6,3
1 = bekend aan de blootgestelden 7 = niet bekend aan blootgestelden	3,9	5,8
1 = bekend aan de geleerden 7 = niet bekend aan de geleerden	2,8	4,8
1 = oude technologie 7 = nieuwe technologie	3,1	6,8
1 = controleerbaar 7 = oncontroleerbaar	3,8	6,7

ongelukskans, maar vooral omdat ongelukken een grote omvang kunnen aannemen en omdat er teveel onbekende, nieuwe, 'griezelige', onbeheersbare aspecten aan zitten. Het voortdurend hameren op de veiligheid (= kleine ongelukskans) van de kant van voorstanders van kernenergie heeft daarom weinig effect; tegenstanders betrekken de ongelukskans immers niet in hun overwegingen.

Aanvaardbaarheid van risico

Het zou mooi zijn wanneer de aanvaardbaarheidsgrens van risico was gelegen bij één bepaald niveau van waargenomen risico, ongeacht andere aspecten van de betrokken technologie of activiteit. Helaas is dit niet het geval; er zijn naast waargenomen risico een aantal omstandigheden die de aanvaardbaarheid van risico mede bepalen. Het belang en het te verwachten voordeel van de activiteit speelt daarbij een grote rol. Nuttige activiteiten zoals brandweerwerk, inenting en autorijden mogen meer risico met zich mee brengen dan terrorisme, gebruik van zoetstof, roken en toepassing van kernenergie. Enige voorbeelden zijn gegeven in tabel II.

In het Nederlandse onderzoek van Vlek en Stallen (3) is eveneens de vraag naar aanvaardbaarheidsniveaus behandeld. De belangrijkste conclusie is dat aanvaardbaarheid wordt bepaald door de noodzakelijkheid van het nagestreefde voordeel of de daaruit voortvloeiende onvermijdelijkheid van blootstelling aan het bijbehorende risico. Impliciet is hiermee wederom gezegd dat de grootte van het waargenomen risico een secundaire invloed heeft: als een riskante activiteit noodzakelijk is wordt het risico op de koop toe genomen.

Overheden en burgers

De tot nu toe besproken onderzoeksresultaten hebben steeds betrekking op de door individuele burgers waargenomen risico's. Wanneer burgers in overheidsdienst bij

Tabel II. Bij gelijk waargenomen risico kan het niveau van aanvaardbaarheid aanzienlijk variëren, o.a. onder invloed van het voordeel dat men verwacht.

Activiteiten en technologieën	waargenomen risico	aanvaardbaar risico
Bezit van kernwapens	78	29
Gebruik van DDT	76	67
Kernenergie	72	50
Gebruik van pesticiden	71	67
Terrorisme	66	40
Roken	68	61
Bezit van strijdgassen	60	43
Bezit van een defensiemacht	61	56

de uitoefening van hun functie dezelfde oordelen hebben als andere burgers zou er vrijwel nooit een conflict bestaat tussen plannen van de overheid en de belangen van individuen. Dat het helaas anders is, is wel duidelijk uit het veelvuldig optreden van protesterende actiegroepen. Dat zulke conflicten onvermijdelijk zijn kan gemakkelijk worden ingezien wanneer men een eenvoudig voorbeeld als de aanlanding van LPG beziet. De overheid kan middels een risicoanalyse trachten een aanlandingsplaats te vinden die een minimaal risico met zich meebrengt; wanneer dat minimale risico wordt gecompenseerd door een aanzienlijk openbaar nut zal het ook voor de overheid aanvaardbaar zijn. De burgers echter die toevallig in de buurt van de aanlandingsplaats wonen worden geconfrontreerd met een risico dat door geen enkel nut wordt gecompenseerd. Hun aanvaardingsnormen liggen derhalve heel anders, en men zal al gauw tot de conclusie komen dat de tijd voor actievoeren is aangebroken. Waar ook in Nederland de aanlandingsplaats wordt gekozen, steeds zal dit verschijnsel optreden, tenzij ook een belangrijk lokaal voordeel, zoals bijvoorbeeld werkgelegenheid, wordt gezien.
Kunnen overheden en burgers verschillen ten aanzien van de aanvaardbaarheidscriteria, ook de risicowaarnemingen zelf kunnen aanzienlijk verschillen. Dit heeft te maken met de dimensies die waargenomen risico beïnvloeden. Het is goed denkbaar dat een overheidsinstantie de schatting van risico-ernst fundeert op berekend risico waarin, zoals we reeds hebben gezien, de ongelukskans een belangrijke component is. Hoewel er geen onderzoek bestaat over de risicoperceptie van overheden is het feit dat risico-analyses zo'n belangrijke rol spelen bij de beleidsbepaling een duidelijke aanwijzing in die richting. Het veiligheidsaspect, de kleine kans dat een ongeluk zich zal voordoen, kan dan een potentieel grote ongeluksomvang compenseren. Dit compensatiemechanisme is bij individuen niet werkzaam; derhalve moeten overheden en burgers wel van oordeel verschillen over de ernst van risico's.

Enige consequenties

Het praktisch belang van de hiervóór gepresenteerde inzichten is natuurlijk dat men kan proberen ze te gebruiken bij het oplossen van maatschappelijke problemen. Men kan er bijvoorbeeld richtlijnen aan ontlenen voor het aanvaardbaar maken van risico. Laten we het risico van kernenergie als voorbeeld nemen.
De situatie ziet er als volgt uit. Veel mensen achten het risico van kernenergie hoog. De overwegingen zijn vooral de massaliteit van mogelijke rampen en de vermeende onzekerheid over diverse consequenties. Tevens is het risico-aanvaardingsniveau ongunstig. De oorzaak hiervan is dat men de voordelen en de noodzaak van kernenergie niet inziet. Los van de vraag of kernenergie nu wel of niet wenselijk is,

kan men aangeven welke ontwikkelingen nodig zijn om deze aanvaardbaar te maken voor een groter gedeelte van het publiek. In dit opzicht verschilt kernenergie niet principieel van snelverkeer, röntgenfotografie, LPG, vuurwerk, kerstboomverlichting en make-up.
Welke zijn die maatregelen? Ten eerste kan men proberen het waargenomen risico te verkleinen. Daartoe moet niet de ongelukskans worden verkleind, maar de potentiële ongeluksomvang. Slovic, Fischhoff en Lichtenstein (2) vermelden dat de door burgers geschatte ongeluksomvang bij kerncentrales boven 10.000 mensenlevens ligt. De Noordamerikaanse Nuclear Regulatory Commission schatte in 1975 dat zelfs onder de meest ongunstige omstandigheden een ongeluk niet meer dan 3.300 mensen kon raken. Dit verschil biedt ruimte voor een aanzienlijke meningsherziening; overigens is ook het getal 3.300 nog te groot om tot een belangrijke reductie van waargenomen risico te komen. Een reductie van nog eens honderdmaal lijkt welhaast noodzakelijk. Het verkleinen van de onzekerheden rond kernenergie zou ook een belangrijke invloed kunnen hebben op het waargenomen risico. Een fundamenteel obstakel daarbij is wel dat zovele technologen het onderling oneens zijn ten aanzien van de gevolgen van kernenergie. Wanneer zij zoveel diversiteit laten bestaan in het wetenschappelijk oordeel mag niet van gewone burgers worden verwacht dat zij allerlei geruststellende uitspraken met vertrouwen tegemoet treden.

De tweede manier om het risico van kernenergie aanvaardbaar te maken is door de aanvaardbaarheidsgrenzen te beïnvloeden. Het belangrijkste middel daarbij is de noodzaak van kernenergie overtuigend aan te tonen. Naarmate het waargenomen risico groter is zal ook de onvermijdelijkheid groter moeten zijn. Een obstakel is hier wederom de onenigheid tussen de deskundigen; ditmaal zijn het vooral politici en economen die nogal eens verwarring zaaien. Zolang deze discussie niet tot een duidelijke conclusie heeft geleid kan niet worden verwacht dat het door burgers waargenomen risico wordt gecompenseerd door een hoog aanvaardbaarheidsniveau.

Samenvatting en conclusie

Iedere schatting van risico is subjectief. Dit geldt zowel voor het door burgers min of meer intuïtief 'waargenomen' risico als voor het 'berekende' risico dat men aantreft in risico-analyses. De belangrijkste component die risico groot maakt in de ogen van burgers is de omvang van een potentiële ramp. Hoe groot een risico echter ook wordt geacht, een riskante activiteit kan altijd worden aanvaard wanneer de onvermijdelijkheid voldoende duidelijk is. De verplichting die een overheid heeft bij het opleggen van risico's aan burgers is: het waargenomen risico aanvaardbaar te maken. Daartoe kan zij trachten het waargenomen risico te verkleinen, of het aanvaardbaarheidsniveau te verhogen. Een beroep op 'berekend' risico is zinloos, omdat daarin de ongelukskans een rol speelt die de burger niet kan meevoelen.

Referenties

(1) B. Fishhoff, P. Slovic and S. Lichtenstein, Fault Trees: Sensitivity of Estimated Failure Probabilities to Problem Representation. *Journal of Experimental Psychology* Human Perception and Performance, (1978) 4, blz. 342-355.

(2) P. Slovic, B. Fishhoff and S. Lichtenstein, Facts and Fears: Understanding Perceived Risk. In R.C. Schwing and W.A. Albers (eds.), *Societal Risk Assessment; How safe is safe enough?* Plenum Press, New York 1980.

(3) C.A.J. Vlek en P.J.M. Stallen, *Persoonlijke Beoordeling van Risico's.* Instituut voor Experimentele Psychologie, Rijksuniversiteit Groningen, 1979.

(4) J. van Rijckevorsel and J. de Leeuw, *An Outline of Principals. Research Report,* Dept. of Data Theory, University of Leyden, 1979.

III MAATSCHAPPIJ

22. ONS GEBRUIK VAN ENERGIE

W.L.M. Adriaansen

Is kernenergie nodig? Dit hoofdstuk geeft geen antwoord op die vraag, maar schetst wel de economische achtergrond die voor de beantwoording van belang is. De industriële samenleving wordt gekenmerkt door een groot energieverbruik. Tot nu toe is die energie hoofdzakelijk geleverd door steenkool, olie en gas, die in voldoende mate en tegen een lage prijs beschikbaar waren. De grenzen van die beschikbaarheid gaan tegenwoordig echter een rol spelen. De feitelijke oorzaak van een vertienvoudiging (binnen zeven jaar) van de prijs van olie – de voornaamste energiebron – is gelegen in de beperktheid van de olievoorraden. Deze prijsstijging is één van de oorzaken van de tegenwoordige economische recessie. Het is nodig geworden het energieverbruik te matigen en vervangende energiebronnen te ontwikkelen. Daarbij zal ook weer aan steenkool moeten worden gedacht.

Dit hoofdstuk handelt over het hoge energieverbruik van onze samenleving. Het schetst – zij het beknopt – de rol van de fossiele brandstoffen, die steeds meer uitgespeeld dreigt te raken, en verschaft zo een decor voor het toneel van de kernenergie. De tekst is woordelijk bijna gelijk aan die van een voordracht aan de Rijksuniversiteit van Leiden in de cursus Milieukunde 1980/1981.

Van steenkool naar olie

De Industriële Revolutie is zonder twijfel een keerpunt geweest in de geschiedenis. Deze begon in Engeland aan het einde van de 18e eeuw en breidde zich daarna uit over wat thans de geïndustrialiseerde wereld heet. Voordien was de samenleving vooral agrarisch georiënteerd. De produktie vond plaats in kleine thuiswerkplaatsen en was arbeidsintensief. De Industriële Revolutie leidde tot grootschalige, kapitaalintensieve produktie. Dat wil zeggen: de produktie werd geconcentreerd in fabrieken en menselijke arbeid werd vervangen door of aangevuld met machinale arbeid. De produktie werd daarmee ook energie-intensief. Dit heeft men zich echter nooit zo goed gerealiseerd, want energie was steeds in voldoende mate en tegen een lage prijs beschikbaar.

Tegelijk met de Industriële Revolutie kwam de mijnbouw op gang. Steenkool nam de plaats in van hout voor het opwekken van stoom. Het steenkoolverbruik nam toe tot de eerste helft van deze eeuw, toen aardolie en olieprodukten de rol van steenkool overnamen (zie tabel I en (1)). Vooral na 1945 is het olieverbruik in de

Tabel I. Marktpenetratie van energiedragers in West-Europa.

	1% in	10% in	tijdsverloop
Steenkool	1820	1850	30 jaar
Aardolie	1911	1942	31 jaar
Aardgas	1958	1972	14 jaar

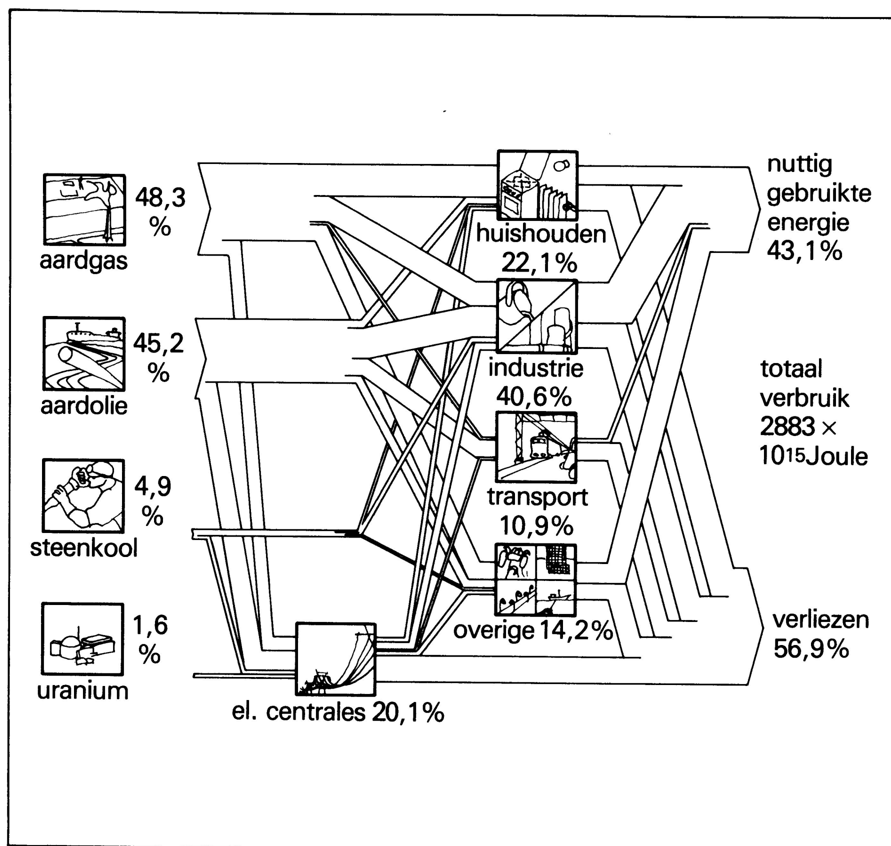
geïndustrialiseerde wereld (de OECD-landen) drastisch gestegen. De overgang van steenkool naar olie kan men toeschrijven aan het grote gemak van de laatste. Stook-

olie voor de industrie en huisbrandolie voor privégebruik kunnen veel gemakkelijker dan steenkool worden vervoerd en opgeslagen. Bovendien is de warmteproduktie beter te regelen en vervuilt olie minder dan steenkool.
Aan olie is echter ook een probleem verbonden: in ons deel van de wereld is deze nauwelijks voorhanden. De vraag naar olie kan alleen bevredigd worden door import uit gebieden waar wel veel olie voorhanden is. Daarvoor zorgden de aardoliemaatschappijen, vooral de zeven grote (waaronder Shell), die bekend staan als de *Seven Sisters*. Deze maatschappijen produceerden olie in het Midden-Oosten, Afrika, Zuid-Amerika en Indonesië. Vervolgens transporteerden zij die met een vloot van tankschepen, waaronder mamoettankers tot 300.000 ton, naar de geïndustrialiseerde wereld. Daar werd de olie geraffineerd en verder gedistribueerd (zie tabel II).

Tabel II. Afhankelijkheid van aardolie en van import van energie, van enkele industrielanden (2).

land	percentage afhankelijkheid van aardolie-import		percentage afhankelijkheid van import van energie	
	1976	1990	1976	1990
Nederland	39,1	51,2	0	50
België	50,6	53,1	85	83
Duitsland	50,8	41,5	58	54
Italië	67,5	54,0	83	70
Engeland	38,0	-1,7	25	0-20
Denemarken	82,4	45,4	100	63
Zweden	56,9	43,7	61	48
V.S.	20,4	26,4	19	26
Japan	72,0	55,5	87	78

Tot voor tien jaar was het olie-aanbod groter dan de vraag. De oliemaatschappijen beheersten de produktie, het vervoer, de verwerking en de distributie zonder dat dit monopolie tot dure energie leidde. Het overheidsbeleid was er op gericht dat niets deze olie-invoer in de weg stond. Deze goedkope olie heeft de wederopbouw na de Tweede Wereldoorlog vergemakkelijkt. De wederopbouw werd gevolgd door een industriële ontwikkeling en een periode van hoogconjunctuur die nooit eerder bereikt waren. Groeicijfers van 5 à 6% per jaar waren regel. Het kon niet op. Daar kwam voor Nederland nog iets bijzonders bij: in de jaren vijftig werd duidelijk dat wij over een enorme voorraad aardgas beschikken.
De aardgasbel bij Slochteren – die overigens helemaal geen bel is maar een opeenhoping van gas in poreus gesteente – wordt geraamd op ruim 2.000 miljard kubieke meter. De vondst van deze 'bel' heeft de Nederlandse energiesituatie aanzienlijk beïnvloed. Eerst was men er eigenlijk niet eens zo gelukkig mee. Rond 1960 was men hier, en ook in het buitenland, van mening dat na tien tot twintig jaar de kerntechniek voldoende ontwikkeld zou zijn om kernenergie te gaan toepassen voor de energievoorziening. Het beleid met betrekking tot het aardgas was om het zo snel mogelijk op te maken. Immers, in de jaren tachtig zou er geen emplooi meer voor zijn. Dus werd het gebruik sterk gestimuleerd: elk huis kreeg centrale verwarming, industrie en elektriciteitscentrales schakelden over op aardgas en de helft van onze produktie werd geëxporteerd voor een prijs van centen per kubieke meter. De afgesloten exportcontracten waren langlopend en er was nauwelijks voorzien dat de prijs nog wel eens zou moeten worden verhoogd.
In 1960 vormde aardgas 1,3% van onze energievoorziening, in 1973 was dat al meer dan de helft (38,3 miljard m^3). In 1980 bedroeg het aardgasverbruik 39,8 miljard m^3, wat echter bij een toegenomen totaal iets minder was dan de helft van onze energievoorziening (zie figuur 1).



Figuur 1
Energiestromen in Nederland (1979).

Olieschaarste

Na 1973 is dit beeld radicaal veranderd. We noemen 1973 het jaar van de eerste energiecrisis. De Yom Kippur-oorlog tussen Israël en zijn Arabische buurlanden bracht het overleg van de olieproducerende landen, verenigd in het OPEC-kartel, in een stroomversnelling. Men zette de oliemaatschappijen onder druk, nam de olieproduktie in eigen beheer en ging een scherp produktie- en prijsbeleid voeren. De prijs werd verhoogd van circa 3 tot 12 dollar per vat ruwe olie van referentiekwaliteit. Op dit moment is die prijs opgelopen tot 34 dollar. De grote sprong omhoog vond plaats in 1979, het jaar van de zogenaamde tweede energiecrisis. Deze sprong heeft overigens minder de aandacht getrokken dan de eerste, die aan het grote publiek heeft duidelijk gemaakt dat energie niet langer goedkoop is. Ook al spelen, vooral in het Midden-Oosten, politieke verwikkelingen een rol, toch kan men stellen dat de feitelijke oorzaak van de prijsstijgingen is gelegen in de beperktheid van de olievoorraden.

De crisis van 1973 is niet de enige oorzaak van de tegenwoordige economische recessie. Eerder waren al verzadigingsverschijnselen duidelijk geworden, die de afzet van sommige produkten deden afnemen. De Westerse industrielanden werden in toenemende mate geconfronteerd met concurrentie van industrielanden in opkomst, zoals Japan en Taiwan. De zogenaamde produktcyclustheorie van de internationale handel, die de opeenvolgende fasen beschrijft van de produktie van artikelen, heeft dit verschijnsel correct voorspeld. Het antwoord van de Westerse

industrielanden op die verschuiving van produktieplaats moet innovatie zijn. Hun kracht ligt in kennis en ervaring, onderzoek en ontwikkeling. Dat geldt ook voor Nederland.

De marktverzadiging belemmerde echter verdere ontwikkelingen. Een voortgaande inflatie was mede het gevolg van het afwentelen van problemen, waarvoor de economische groei geen oplossing bood. Of liever, de groei was niet meer voldoende om alle claims die men gewend was te stellen te kunnen honoreren. Bij de energiecrisis van 1973 ontbrak de veerkracht die het bedrijfsleven nodig had om de problemen het hoofd te bieden. Door een gericht overheidsbeleid is de inflatie weliswaar afgenomen, maar werkloosheid is er voor in de plaats gekomen. Bij een matigingsbeleid dat niet selectief is kan daarvoor geen oplossing worden gevonden. In enkele sectoren echter, waar innovatie mogelijk is, moet groei mogelijk zijn, zodat deze sectoren een voortrekkersfunctie zouden moeten gaan vervullen. Dit vereist visie op de gewenste industriële ontwikkeling, zowel bij de industrie zelf als bij de overheid. Voor ons land komt daar bij dat onze exportgerichte industrie energie-intensief produceert, dat wil zeggen per eenheid produkt meer energie verbruikt dan in andere landen. Dit is een gevolg van de aanwezigheid van de olieoverslag en -raffinage in het Rijnmondgebied en de beschikbaarheid van goedkoop aardgas. Nu zowel olie als gas snel in prijs zijn gestegen is onze positie daarmee extra kwetsbaar geworden. Dit vereist in de komende decennia een ombuiging van de industriële structuur en speciale aandacht voor de energievoorziening van de bedrijfssector.

Op het ogenblik is er geen sprake van groei van het bruto nationaal produkt. Bovendien zal onze betalingsbalans slechter worden door afnemende aardgasexporten en zal de beroepsbevolking verder toenemen. Eigenlijk zou een groei van het bruto nationaal produkt van ca. 2% per jaar nodig zijn om de problemen die dat oplevert het hoofd te bieden. Reëel gaan we er dan nog niet op vooruit.

Op wereldschaal hebben we het volgende beeld van de energievoorziening. Sinds 1973 is de olie-aanvoer steeds voldoende geweest, onder andere omdat Saoedi-Arabië zijn produktie bewust zo groot houdt als de technische capaciteit toestaat (9 miljoen vaten per dag). Maar intussen is de prijs ruim tien keer zo hoog. Het moment nadert dat het aanbod onvoldoende is om aan de vraag te kunnen voldoen. Die vraag groeit vooral ook door de oliebehoefte van de ontwikkelingslanden. Tijdens de Wereld-Energieconferentie van 1980 (3) is de verwachting uitgesproken dat de ontwikkelingslanden tegen de eeuwwisseling evenveel olie nodig zullen hebben als nu in de gehele wereld wordt verbruikt. Alle prognoses wijzen op een top in de wereld-olieproduktie in de jaren negentig, gevolgd door een daling die zich voortzet tot ver in de volgende eeuw (3). Aardolie is dus niet langer onbeperkt beschikbaar en het wordt tijd uit te zien naar andere energiebronnen.

Waar wij in Nederland dan het eerst aan denken is het aardgas. Maar dit is eveneens beperkt voorradig. Aardgas wordt op een aantal plaatsen ter wereld gewonnen, meestal in combinatie met aardolie. In het gebruik kan men deze bronnen gemakkelijk door elkaar vervangen – reden voor een prijskoppeling. Wanneer wij aardgas in het buitenland kopen ter aanvulling van de eigen produktie en met het doel de eigen voorraden langer intact te laten, dan moet daarvoor een hoge prijs worden betaald.

Ons aardgas zal bij een spaarzaam verbruik voldoende zijn tot na de eeuwwisseling. Om dit te bereiken wordt het alleen voor huishoudelijk gebruik beschikbaar gesteld en voor enkele hoogwaardige toepassingen. Het gebruik in de industrie en de elektriciteitscentrales wordt echter teruggedraaid. Aldus kan de 'bel' van Slochteren een buffer vormen voor storingen in de energie-aanvoer, zowel voor korte als langere duur.

Besparingen

De goedkoopste manier om de energievoorziening zeker te stellen is minder energie te gebruiken. Wanneer we spreken over besparing op het gebruik moeten we een onderscheid maken tussen twee zaken: verbetering van efficiëntie en feitelijke vermindering.
Verbetering van efficiëntie wil zeggen dat men hetzelfde resultaat bereikt met minder energie. Wanneer we ons huis isoleren en dubbel glas aanbrengen behouden we dezelfde temperatuur en dus hetzelfde wooncomfort met minder energieverbruik. Wanneer we de thermostaat lager zetten en desnoods een trui extra aantrekken hebben we minder wooncomfort maar gebruiken we óók minder energie. Op de lange duur is de tweede manier van groter belang, want het besparingspotentieel is groter en er hoeft bovendien minder energie te worden geïnvesteerd in de produktie van isolatiemateriaal en extra glas. Het is goed te bedenken dat ruimteverwarming een aanzienlijk deel opeist van ons totale energieverbruik (zie figuur 1).
Het Nederlandse energiebesparingsbeleid is gericht op 30% minder gebruik rond de eeuwwisseling, althans vergeleken met de situatie wanneer er geen besparingsmaatregelen zouden worden getroffen. Het besparingsbeleid betreft vooral verbetering van de efficiëntie, volgens een programma dat is beschreven in de Regeringsnota Energiebeleid (1). Overigens zij opgemerkt dat de genoemde besparing, zelfs indien deze wordt gerealiseerd, niet voldoende is om het totale energieverbruik te verminderen. Wanneer men zijn fantasie gebruikt is zeker een aanzienlijker besparing mogelijk, maar de realisatie daarvan is niet altijd eenvoudig en dikwijls kostbaar. Als voorbeeld kan de benutting van afval- en restwarmte worden genoemd (4).
Afvalwarmte wordt geproduceerd in de industrie en bij de elektriciteitsproduktie. Hier wordt de primaire energie maar voor een klein gedeelte (ongeveer 30%) omgezet in de gevraagde secundaire energie, als gevolg van thermodynamische wetten. Het grootste deel wordt geloosd in de lucht of in het oppervlaktewater. Men kan deze afvalwarmte onder omstandigheden echter gebruiken voor ruimteverwarming. In opdracht van de Algemene Energieraad is onlangs een warmtekaart gemaakt, waarop industriële concentraties en elektriciteitscentrales zijn aangegeven die deze warmte produceren en tegelijk andere industrieën, woonwijken en tuinbouwgebieden die deze zouden kunnen gebruiken. Becijferd is dat het besparingspotentieel ten minste 5 miljard m^3 aardgas-equivalenten is, of bijna 20% van het aardgasgebruik per jaar in ons land. De transportafstand voor deze warmte bedraagt, afhankelijk van het warmte-aanbod, 5 tot 30 km, zodat hier vooral mogelijkheden tot besparing op het gebruik van primaire (fossiele) energie liggen op provinciaal en regionaal niveau.
Aanzienlijke energiebesparing is ook mogelijk op het terrein van de ruimtelijke ordening. Wanneer in streek- en bestemmingsplannen meer rekening wordt gehouden met de mogelijkheid van energiebesparing kan men tot een betere benutting van toch al voorhanden warmte komen. In dit verband moet, naast afval- en restwarmte, worden gedacht aan actieve en passieve benutting van zonnewarmte.

Opnieuw steenkool

Een NIPO-enquête, gehouden in april 1981, heeft uitgewezen dat vier van elke tien Nederlanders vinden dat de kerncentrales in ons land dicht moeten en dat op grote schaal moet worden overgeschakeld op kolencentrales. De laatste jaren zijn reeds grotere kolencentrales gebouwd, bij Geertruidenberg en Nijmegen, als reactie op de sterk stijgende olieprijzen. Voorts bestaat de mogelijkheid tot ombouw van

enkele eenheden van de Maascentrale en de bouw van kolengestookte elektriciteitscentrales bij Dordrecht en Amsterdam, waarmee het kolengebruik in deze sector kan toenemen tot 6 miljoen ton steenkooleenheden per jaar in de tweede helft van de jaren tachtig, een verviervoudiging dus (5). Inderdaad kan ook de steenkool helpen om het energieprobleem op te lossen.

In tegenstelling tot de voorraden aardolie en aardgas zijn de voorraden steenkool groot en evenwichtig over de aardbol verspreid. Er is vele tientallen keren meer energie in steenkool dan in olie of gas. Toch heeft deze energiebron beperkte gebruiksmogelijkheden en vergt zij een gecompliceerde winningstechniek. Ondergrondse kolenwinning is, ook als die gemechaniseerd is, zwaar en gevaarlijk en de lust om in de mijnen te gaan is dan ook niet groot. Tijdens stakingen in Polen – een belangrijke kolenleverancier – hebben de mijnwerkers daar verbetering van hun beloning en arbeidsomstandigheden bevochten. Nog is steenkool relatief goedkoop, dankzij lage lonen bij de winning (vooral in de Verenigde Staten en Australië, waar dagbouw plaatsvindt, en in Zuid-Afrika, waar mijnarbeid zeer goedkoop is), maar men mag er niet op rekenen dat dit zo blijft. Ook steenkool wordt duur. Er vindt onderzoek plaats naar nieuwe winningstechnieken, zoals met slurries en ondergrondse vergassing, maar die zijn erg gecompliceerd.

Onder de Nederlandse bodem bevinden zich aanzienlijke steenkoolvoorraden, maar op de meeste plaatsen op een diepte van meer dan 1.000 tot 1.200 meter. Deze steenkool behoort tot een bekken, dat zich van Westfalen uitstrekt tot in Engeland. In Zuid-Limburg, de Peel, de Achterhoek en bij Amersfoort ligt de top van de laag minder diep onder het oppervlak. De steenkool zou daar, technisch gesproken, winbaar zijn. Er bestaat echter onvoldoende inzicht in de structuur van de ondergrond en de dikte van de kolenlagen om nu reeds tot een hernieuwde mijnbouw te kunnen besluiten. Voorshands zijn de economische perspectieven voor deze mijnbouw nog slecht.

De Kolennota (6) gaat ervan uit dat, ongeacht de beslissing over kernenergie, het kolengebruik in ons land zal toenemen tot 26 miljoen ton per jaar rond de eeuwwisseling. Het gaat hier om geïmporteerde steenkool. Worden geen nieuwe kerncentrales gebouwd, dan loopt dit op tot 43 miljoen ton per jaar. Ter vergelijking: we gebruiken thans 5,5 miljoen ton steenkool per jaar, waarvan het grootste deel cokes betreft voor de staalproduktie.

De situatie wordt dringend. Gas en olie zijn duur geworden. De tegenwoordige spanningen in het Midden-Oosten zullen wellicht niet tot een derde energiecrisis leiden, maar zullen ook geen matigende invloed hebben op de olieprijs. Het resultaat is een verdere conversie bij de olieraffinage waardoor steeds meer lichte produkten beschikbaar komen en minder stookolie. De lichte produkten, zoals benzine en nafta, brengen een hogere prijs op. De beschikbaarheid van stookolie neemt daardoor af. Primaire raffinage in de OPEC-landen levert wel stookolie, maar die heeft een hoger zwavelgehalte dan hier is toegestaan (1,5 tot 2%). Daarom is hier nog weer conversie nodig, hetgeen duur is. Het resultaat is dat stookolie, indien beschikbaar, perperduur is. Binnen enkele jaren – waarschijnlijk al in 1985 – zullen ernstige problemen ontstaan in de brandstofvoorziening van de industrie en van de elektriciteitscentrales, waarmee we nu al rekening moeten houden.

Een tweede conclusie van de Wereld-Energieconferentie van München (3) is geweest dat de kolenprogramma's in de wereld niet zo snel lopen als aanvankelijk werd gedacht. Dit is een reden tot zorg. Een andere reden tot zorg is de milieuvervuiling die het gebruik van kolen met zich meebrengt. We denken hier aan de lozing van zwaveldioxyde, stikstofoxyden en vliegas. Rookgasontzwaveling en afvang van vliegas zijn noodzakelijk. Daarnaast bestaat er nog verschil van inzicht over de uiteindelijke gevolgen van de lozing van het koolzuurgas, die het klimaat zou kunnen gaan beïnvloeden. Steenkoolgebruik op grote schaal brengt problemen met zich mee, die het grote publiek zich nog niet realiseert. Toch moet men deze

zaken mede in beschouwing nemen als men het gebruik van steenkool wil afwegen tegen dat van kernenergie voor de produktie van elektriciteit.
Steenkool kan op verschillende manieren worden toegepast. Gemakkelijk en goedkoop is de directe verbranding, maar daarvan is de efficiëntie laag en de vervuiling groot. Beter is steenkoolvergassing. Hierbij ontstaat gas met een lagere verbrandingswaarde dan het aardgas uit Slochteren. Er bestaat een plan van de Gasunie voor de produktie van dit gas, dat dan gemengd wordt met hoog-calorisch geïmporteerd gas, zodat een gas ontstaat van Slochteren-kwaliteit. Ook de Vereniging van Exploitanten van Gasbedrijven in Nederland (VEGIN) en de oliemaatschappijen hebben plannen voor de produktie van kolengas. Wil het produkt aantrekkelijk zijn, dan moet het vergassingsproces op een voldoende grote schaal worden uitgevoerd. Dit slaat zowel op de kosten als op het tegengaan van milieuvervuiling. Grootschalige projecten bieden de mogelijkheid van kostenreductie en maatregelen ter voorkoming of terugdringing van ongewenste lozingen. Misschien dichter binnen bereik dan kolenvergassing is de steenkoolverbranding bij zeer hoge temperatuur. Dit zou kunnen met de zogenaamde wervelbedverbranding. De daarvoor noodzakelijke technologie levert echter problemen op, zodat de praktische toepassing nog enige tijd op zich zal laten wachten.

Keuze-probleem

Wanneer wij de gehele situatie overzien, lijkt het duidelijk dat er een keuze zal moeten worden gedaan. Het is mogelijk het energieverbruik drastisch te beperken, maar alleen wanneer de bevolking bereid is daarvoor offers in comfort te brengen. De mogelijkheid voor de overheid om regelend op te treden is beperkt, zodat men daar niet de oplossing mag zoeken.
Olie en aardgas worden duur en de beschikbaarheid neemt af. Natuurlijk is het mogelijk om meer eigen aardgas te gaan gebruiken en de prijs daarvan op een lager niveau vast te stellen. Dat zou echter inhouden dat de voorraden aardgas eerder uitgeput raken, waarmee het energieprobleem alleen maar in de tijd wordt verplaatst. Het wordt niet opgelost en de problemen die straks zullen moeten worden overwonnen zullen aanzienlijk groter zijn dan de problemen van nu. Er is recentelijk een studie verricht naar de mogelijkheid van het gebruik van windenergie voor de opslag van water in grote bekkens in de Markerwaard of in de Noordzee voor de produktie van elektriciteit. Als vervolg daarop wordt de gedachte van energie-opslag in de vorm van samengeperste lucht in grote reservoirs onder de grond geopperd, die eveneens serieus onderzoek verdient. Ook directe elektriciteitsproduktie met windmolens en het gebruik van zonne-energie zijn onderwerp van nader onderzoek, maar de bijdrage van deze stromingsbronnen aan de Nederlandse energievoorziening wordt in deze eeuw niet hoger geraamd dan enkele procenten. Het kolengebruik zal moeten toenemen. Nieuwe verwerkingstechnieken komen pas in de verderafgelegen toekomst beschikbaar zodat enerzijds de milieuconsequenties niet mogen worden onderschat, maar anderzijds door al te stringente normen de introductie van steenkool bij gebruik in kleinere eenheden niet mag worden ontmoedigd.
Tegen deze achtergrond zal – nog los van kostprijsberekeningen – de vraag moeten worden beantwoord of het mogelijk of verstandig is af te zien van het gebruik van kernenergie voor elektriciteitsproduktie of niet. Dat is dan de kernvraag voor de Brede Maatschappelijke Discussie.

Referenties

(1) *Regeringsnota Energiebeleid*, Deel 1, Staatsuitgeverij, Den Haag 1979.

(2) *Energy Policies and Programmes of IEA Countries*, Organisation for Economic Cooperation and Development, Parijs 1978.

(3) *World Energy Conference*, München 1980.

(4) *Afval- en Restwarmte als Energiebron*, Advies van de Algemene Energieraad (AER) aan de Minister van Economische Zaken 15 oktober 1980, Staatsuitgeverij, Den Haag 1980.

(5) *Gebruik van Kolen in de Industrie*, Advies van de Algemene Energieraad (AER) aan de Minister van Economische Zaken 12 mei 1981, Staatsuitgeverij, Den Haag 1981.

(6) *Regeringsnota Energiebeleid*, Deel 2, Staatsuitgeverij, Den Haag 1980.

23. PERSPECTIEF VAN DE KERNENERGIE

C.D. Andriesse

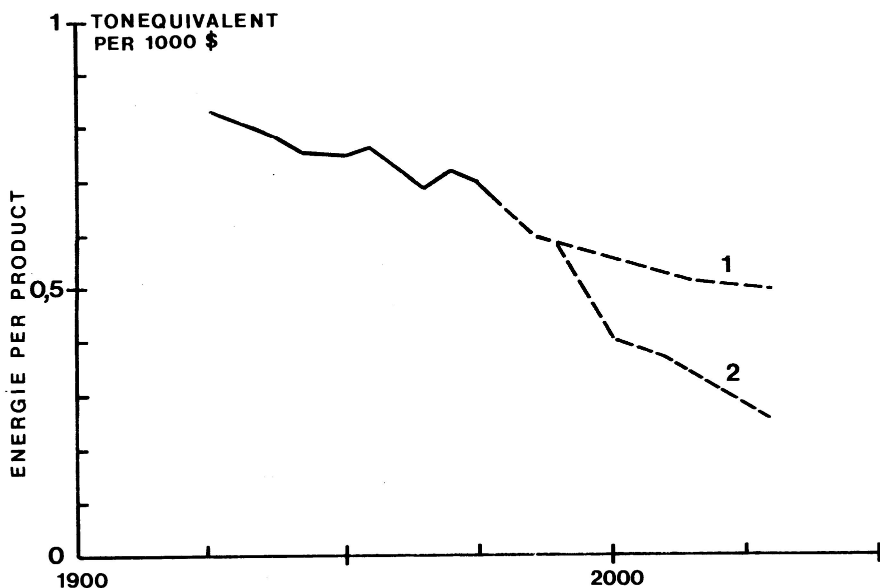
Kan kernenergie in de wereldwijd groeiende behoefte aan energie voorzien? Dit hoofdstuk schetst de grootte van die behoefte, het potentieel van de kernenergie en de problematiek bij de invoering daarvan. Waar de wereldbevolking met meer dan honderd miljoen mensen per jaar groeit en een duidelijke beperking geldt voor de beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, staan we voor een ernstig energieprobleem. Kernenergie is één van de weinige energiebronnen die wezenlijk aan de oplossing van dit probleem kunnen bijdragen, op voorwaarde dat de beperking van de uraniumvoorraden wordt opgeheven door de ontwikkeling van kweekreactoren. De invoering van kernenergie stuit echter op maatschappelijke weerstanden, die groter zijn naarmate de economische noodzaak minder sterk wordt gevoeld. Een vergelijking wordt gemaakt tussen landen in West-Europa, waar grote verschillen bestaan in de mate waarin kernenergie is en wordt ingevoerd.

Wat is, gegeven onze algemene vraag naar energie, het aanbod van de kernenergie? In dit hoofdstuk wordt geprobeerd zicht te geven op de mogelijkheden en beperkingen van deze energiebron, waarbij technologische en maatschappelijke factoren met elkaar in wisselwerking treden. Aan de orde komen het energieprobleem, het potentieel van de kernenergie en de realisatie daarvan.

Het energieprobleem

Met een schok heeft de oliecrisis van 1973 iedereen duidelijk gemaakt dat er een energieprobleem is. Eerder al hadden specialisten, zoals bijvoorbeeld Meadows (1), er op gewezen dat onze hulpbronnen snel opdrogen en dat ons daarom ernstige problemen wachten. Dit geldt ook de energie, waarvan onze samenleving in sterke mate afhankelijk is. Die blijkt schaars en dus duur te worden: vooral sinds 1979 is de olieprijs snel aan het stijgen. Volgens de beste schattingen (2) resteert nog 300 miljard ton, wat overeenkomt met een energie van $1,4 \times 10^{22}$ joule. Deze voorraad wordt bij het tegenwoordige oliegebruik in de wereld van $3,2 \times 10^{12}$ watt in ruim honderd jaar uitgeput, en binnen honderd jaar als het gebruik – zoals te verwachten is – nog toeneemt. Omdat olie momenteel de meest gebruikte energiedrager is, leiden de prijsstijgingen tot flinke verschuivingen in de besteding van de nationale inkomens. Mede als gevolg daarvan is de groei uit onze economie verdwenen en staat veel werkgelegenheid in de energie-intensieve industrie op het spel. We moeten ons energiegebruik matigen en serieus uitzien naar vervangende energiedragers. Overigens is reeds lang een beweging gaande naar een produktie die minder energie vraagt (zie figuur 1), en het gaat er dus om die beweging zo mogelijk te versnellen.

Zicht op de problematiek krijgen we pas door afstand te nemen, zowel in tijd als in ruimte. Aanbod van en vraag naar energiedragers zijn immers niet steeds op elkaar afgestemd – er is sprake van invoeringstijden en plaatselijke verschillen in behoeften en beschikbaarheden. Het Internationaal Instituut voor Toegepaste Systeem-Analyse (IIASA) heeft in een zes jaar durende studie, waaraan 148 onderzoekers uit

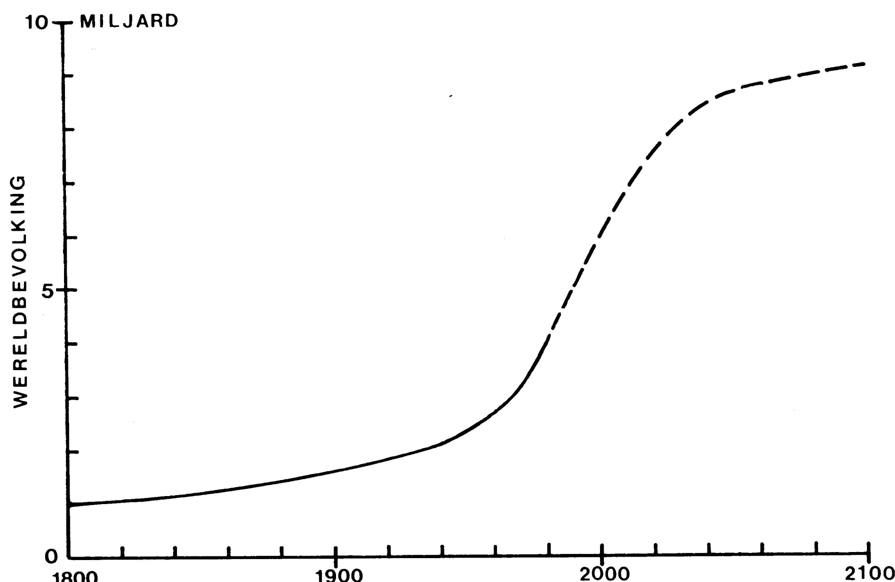


Figuur 1
Afname van de energie per bruto produkt in West-Europa, met toekomstprojecties volgens het IIASA (1) en Colombo (2) - zie tekst.

---

tweeëntwintig landen deelnamen, geprobeerd dat zicht te krijgen (3). Het biedt een wereldwijd perspectief voor de komende vijftig jaar. Waarschijnlijk is alleen het lage-groeiscenario van deze studie realistisch. We zullen dit scenario samenvatten. Tevens zullen we ingaan op het nulgroeiscenario van Colombo (4). (Ter vermijding van misverstand: 'groei' slaat hier op het energiegebruik per hoofd van de bevolking en niet op de industriële produktie.) Maar hoe realistisch zijn de toekomstvoorspellingen? De studie van het IIASA gaat uit van een geschatte vraag naar energie en zoekt dan uit hoe aan die vraag kan worden voldaan. Nu wordt de vraag overwegend bepaald door de te verwachten groei van het aantal mensen in de wereld. Van minder belang zijn de verwachtingen met betrekking tot de economische groei en de technologische vooruitgang. Het energieprobleem valt ruwweg samen met het demografische probleem en de overheersende vraag is dus hoe de wereldbevolking zal toenemen.

Figuur 2 toont de door het IIASA aangenomen ontwikkeling van de wereldbevolking: een verdubbeling van 4 miljard mensen in 1980 tot 8 miljard mensen in 2030. Er is weinig reden om aan de juistheid van deze explosieve groei te twijfelen. Het aangenomen verloop sluit globaal aan op de verwachtingen die zijn besproken op de Wereld-Bevolkingsconferentie van de Verenigde Naties in Boekarest van 1974. Verschil van inzicht bestaat over de ontwikkeling op lange termijn: het aantal mensen zou zich aan het eind van de 21e eeuw even onder de 10 miljard stabiliseren en niet doorgroeien tot ongeveer 13 miljard. Geen verschil van inzicht bestaat over de aanvankelijke ontwikkeling. Het bevolkingsaantal in 2030 van 8 miljard is waarschijnlijk binnen 10% nauwkeurig. De explosieve ontwikkeling resulteert uit een toename van de levensduur door betere medische zorg en uit een afname van het aantal geboorten door betere opleiding en het toepassen van contraceptie. Het gaat hier in hoofdzaak over de bevolking van de Derde Wereld – thans reeds 72% van het totaal. De bevolking van de geïndustrialiseerde wereld, die maar weinig zal toenemen, is om soortgelijke redenen in de afgelopen eeuw sterk gegroeid. Daarom zal in 2030 ongeveer 85% van de wereldbevolking in de Derde Wereld wonen, en wel voor 2/3 in steden. Het afremmen van de bevolkingsgroei in



Figuur 2
Toeneming van de wereldbevolking met toekomstprojectie volgens het IIASA.

de Derde Wereld zal alleen mogelijk zijn als de levensomstandigheden daar aanzienlijk worden verbeterd. Gezien de snel voortschrijdende verstedelijking is dit ondenkbaar zonder een groei van het energiegebruik per hoofd van de bevolking.

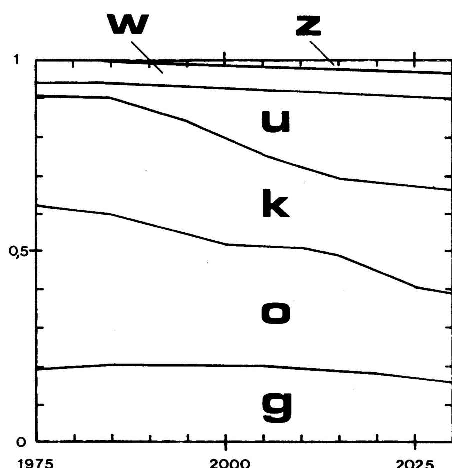
Zowel de sterke bevolkingsgroei als de noodzaak om het energiegebruik per hoofd in de Derde Wereld te laten toenemen bepalen de toekomstige energievraag. Tegenwoordig is het totale wereld-energiegebruik 8×10^{12} watt (= 8 TW), wat neerkomt op 2.000 watt (= 2 kW) per hoofd van de bevolking gemiddeld. Zonder groei van het gemiddelde energiegebruik per inwoner krijgen we Colombo's scenario van 16 TW in 2030, waarbij dan een herverdeling plaatsvindt ten gunste van de Derde Wereld en ten koste van de geïndustrialiseerde wereld. Wanneer men een daling van het energiegebruik per hoofd in de geïndustrialiseerde wereld ongewenst acht, kan men kijken naar het lage-groeiscenario van het IIASA dat leidt tot 22 TW in 2030. Tabel I vat markante uitkomsten van deze scenario's voor verschillende gebieden van de wereld samen.

Tabel I. Energiegebruik per hoofd van de bevolking in kilowatt.

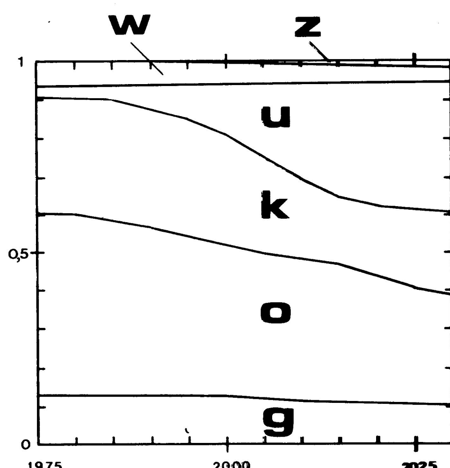
gebied		in 1975	in 2030 volgens IIASA-lage groei	in 2030 volgens Colombo-nulgroei
Noord-Amerika	I	11,2	13,9	8,0
Rusland en satellieten	II	5,1	10,4	6,2
West-Europa en Japan	III	4,0	5,9	3,2
Zuid-Amerika	IV	1,1	2,9	2,8
Afrika en Z.O.-Azië	V	0,2	0,7	0,7
Midden-Oosten	VI	0,9	3,5	3,6
China	VII	0,5	1,3	1,2
gemiddeld		2,0	2,8	2,0

Het blijkt dat in beide scenario's de energie, die voor de produktie nodig is, zal teruglopen. Voor Nederland, dat thuishoort in gebied III, zijn er echter belangrijke verschillen (zie figuur 1). Men vindt in het IIASA-scenario een geleidelijke teruggang, die goed aansluit bij de teruggang in het verleden. In het Colombo-scenario wordt echter een snelle teruggang gevonden tussen 1990 en 2000. Het is niet zeker dat technologische vernieuwingen in

het produktieproces die snelle teruggang kunnen realiseren. We komen hierop nog terug.
Er moet in de komende vijftig jaar daarom minstens 8 en bij voorkeur 14 TW meer energie worden geproduceerd dan nu het geval is. Dat kan, is de niet-triviale conclusie van de IIASA-studie. Maar het kan alleen als àlle hulpbronnen die nu beschikbaar of in ontwikkeling zijn volledig worden benut. De rol die de verschillende energiedragers in het lage-groei-scenario van het IIASA spelen is weergegeven in de figuren 3 en 4. Allereerst herinneren we eraan dat dit scenario berust op diep-



Figuur 3
IIASA-projecties van het aandeel van verschillende energiedragers in de wereldenergieproduktie.
g = gas, o = olie, k = kolen, u = uranium, w = waterkracht, z = zon.



Figuur 4
IIASA-projecties van het aandeel van verschillende energiedragers in de Westeuropese energieproduktie.
g = gas, o = olie, k = kolen, u = uranium, w = waterkracht, z = zon.

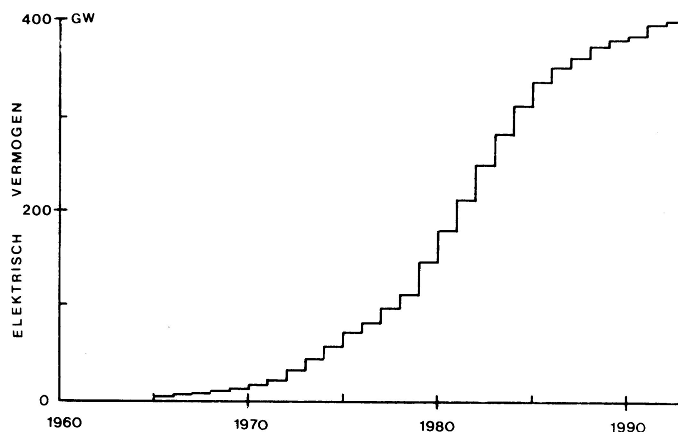
gaande analyses van de beschikbaarheid en kostprijs van energiedragers in de loop van de tijd en van de grenzen, zoals vervoersmogelijkheden, materialen en milieuvervuiling, die gesteld worden aan hun toepassing. Vervolgens stellen we vast dat de rol van olie en aardgas zeer belangrijk blijft, ofschoon het uitgeput raken van de olievoorraad leidt tot een geleidelijke afname. De steenkoolproduktie zal, na een langzame groei tot het eind van deze eeuw, in de volgende eeuw sneller gaan groeien om synthetische brandstoffen te kunnen maken, die de rol van olie gedeeltelijk kunnen overnemen. Steenkool zal dan in mindere mate beschikbaar zijn voor elektriciteitsproduktie. Dit is mogelijk omdat kernenergie het leeuwedeel van de elektriciteit kan opwekken, mits de stap naar kweekreactoren wordt gezet. Dit belangrijke punt zal in de volgende paragraaf worden toegelicht. Overigens tilt het IIASA bijzonder zwaar aan het koolzuurgas-probleem dat optreedt bij het verbranden van fossiele brandstoffen, vooral steenkool. De lozing van koolzuurgas kan reeds in 2030 tot een merkbare temperatuurverhoging van de hele aarde leiden, met ingrijpende gevolgen voor milieu en maatschappij. Waterkracht zal ongeveer constant bijdragen aan de energieproduktie, terwijl andere vernieuwbare bronnen – zoals zonne-energie – in deze vijftig jaar maar weinig zullen opleveren. Dit laatste is de uitkomst van economische factoren (voorlopig is het veel te duur) en de lange ontwikkelingstijd van elke nieuwe technologie. Dat betekent echter niet dat ook deze bronnen niet voortvarend zouden moeten worden ontwikkeld. Dit scenario samenvattend, kan men opmerken dat het voor de noodzakelijke groei van de

energieproduktie essentieel is dat kort na de eeuwwisseling twee technologieën voluit ontwikkeld zijn en volop kunnen worden ingezet: de produktie van synthetische brandstoffen, vooral methanol, uit steenkool èn de produktie van splijtstoffen, vooral plutonium-239, uit natuurlijk uranium.
Zoals blijkt uit figuur 4, zal volgens het IIASA in ons deel van de wereld in 2030 kernenergie iets meer dan 30% van alle energie produceren, terwijl olie dan juist iets minder dan 30% bijdraagt, gevolgd door steenkool – waaronder begrepen synthetische vloeistoffen – (22%), aardgas (10%), waterkracht (6%) en zonne-energie (2%). Daarmee heeft kernenergie, nu nog maar van ondergeschikt belang, de rol van olie als voornaamste energiedrager overgenomen. Bijna alle elektriciteit wordt er uit opgewekt en het aandeel van elektriciteit in de totale energieproduktie is hoger dan nu het geval is. In het nulgroei-scenario van Colombo liggen de zaken wezenlijk anders. Hier is in 2030 in gebied III het gemiddeld gebruik per hoofd van de bevolking 3,2 kW (zie tabel I), wat maar 54% is van het gebruik in het IIASA-scenario. In beginsel geeft dit de ruimte om af te zien van de grootschalige toepassing van kernenergie. Omdat momenteel sterke maatschappelijke krachten tegen kernenergie werken, is het van belang even bij Colombo's scenario stil te staan. Hierboven werd al opgemerkt dat dit scenario met name in de jaren negentig sterke energiebesparingen in de produktie veronderstelt. Dit houdt in dat niet alleen in Nederland, maar in heel West-Europa (en de rest van gebied III), snel en drastisch moet worden omgeschakeld naar zuiniger produktiemethoden. Een dergelijke omschakeling wordt ook bepleit door voorvechters van zachte technologie, zoals Lovins (5). Zachte technologie houdt een kleinschalige toepassing in van vernieuwbare energiebronnen en is in wezen dezelfde technologie die in de Derde Wereld nog overwegend is. Maar deze technologie leidt niet tot energie-arme produktie: er is bijvoorbeeld geen verschil tussen de hoeveelheid energie die nodig is voor de produktie in Zuid-Amerika en die in West-Europa. Daarom is het onzeker of de noodzakelijke sprong naar zuiniger produktiemethoden met zachte technologie bereikt kan worden, om het zacht te zeggen; nog afgezien van de onmogelijkheid om de vernieuwbare energiebronnen tijdig en op voldoende schaal toegankelijk te maken. Tekenend is dat op de Wereld-Energieconferentie van München in 1980 nauwelijks over het zachte alternatief is gesproken (6). Voor de geïndustrialiseerde wereld werd het èn maatschappelijk èn ecologisch èn economisch als zeer problematisch gekenschetst. Dus is toch weer nieuwe harde technologie nodig, zoals de micro-elektronica (chips). De uitvoerbaarheid van Colombo's scenario is sterk afhankelijk van de mogelijkheid om de noodzakelijke maatschappelijke en industriële veranderingen tijdig door te voeren. Daarover past scepsis. Natuurlijk kan men het scenario ook volgen mèt kernenergie en minder olie en steenkool. Gelet op het bovenstaande lijkt het lage-groei-scenario van het IIASA realistischer. Maar dit scenario staat of valt met de grootschalige toepassing van kernenergie: hier is kernenergie noodzaak en geen optie.

Potentieel van de kernenergie

Ontdekt in 1938, experimenteel toegepast sinds 1942, vanaf 1953 producent van elektriciteit, sterk ingevoerd tussen 1965 en 1975 en thans gerealiseerd in 250 grote reactoren, is kernsplijting niet langer een klein kind. In 1980 was het geïnstalleerde thermische vermogen uit kernsplijting ruim 5×10^{11} watt of ruim 6% van het wereld-energiegebruik, waaruit $1{,}8 \times 10^{11}$ watt elektriciteit (180 GW(e)) wordt verkregen. Hierbij is de lichtwaterreactor in zijn drukwater- en kokendwater-versie het trekpaard geworden. Daarnaast zijn de Russische *Voronezh*-versie, de zwaarwaterreactor en de gasgekoelde grafietreactor volledig ontwikkeld en commercieel toegepast. In deze reactoren wordt maar één van de twee à drie neutronen, die bij splijting van een uraniumkern vrijgekomen, gebruikt om een kettingreactie van

splijtingen te onderhouden, terwijl de overige neutronen nog niet optimaal worden benut. In ontwikkeling zijn reactoren die hoge temperaturen en daarmee betere thermodynamische rendementen geven, en convertoren of kweekreactoren, die tot een rationeler gebruik van de splijtingsneutronen en het uranium leiden. Daarmee is de splijtingstechnologie bezig volwassen te worden.
Figuur 5 toont de toeneming van het wereldvermogen in elektriciteit uit kerncen-



Figuur 5
Groei van het elektrisch vermogen uit kernenergie in de wereld.

trales. Men ziet dat de aanvankelijke groei met ongeveer 30% per jaar is teruggelopen tot bijna 20% per jaar en dat hij tegen het eind van deze eeuw zal zijn verdwenen – tenzij in de komende jaren besluiten worden genomen over een verdere uitbouw. Deze besluiten hangen af van de vooruitzichten op de oplossing van een aantal eigensoortige problemen en op de beschikbaarheid van kernenergie op de lange termijn. De problemen hebben betrekking op de reactorveiligheid, de effecten van straling, het radioactief splijtingsafval, de relatie met kernwapens en de maatschappelijke aanvaarding. Ze zijn elders in dit boek besproken. Gesteld dat bevredigende oplossingen voor die problemen gevonden kunnen worden, dan blijft de vraag: is het potentieel van de kernenergie voldoende om een verdere uitbouw te rechtvaardigen? Het antwoord daarop hangt in de eerste plaats af van de hoeveelheid beschikbare splijtstof. Ofschoon deze vraag in dit boek apart behandeld wordt, gaan we er vanwege zijn belang ook hier nog even op in.
In een gemeenschappelijke studie kwamen het kernenergie-agentschap van de OESO en het Internationale Atoomenergie Agentschap IAEA (7) in 1978 tot de conclusie dat er 4,3 miljoen ton natuurlijk uranium te winnen is voor prijzen beneden 300 gulden per kilogram. In 1979 verhoogde de Internationale Evaluatie van de Splijtstof-Cyclus INFCE (8) deze schatting tot 4,8 miljoen ton voor dezelfde lage prijzen. Het betreft hier rijke uraniumertsen (percentages boven 0,1), verspreid over de hele wereld (niet beschouwd zijn Rusland met zijn satellieten en China), waarvan de aanwezigheid bewezen of met een grote mate van zekerheid bekend is. De vermoede of speculatieve reserves van hetzelfde rijke erts moeten veel groter zijn. De INFCE schat ze op een totaal van 14,2 tot 26,4 miljoen ton, terwijl het IIASA ze op 24,5 miljoen ton stelt. De laatste hoeveelheid verkrijgt men door het landoppervlak van de wereld te delen door dat van de Verenigde Staten, en vervolgens deze verhouding te vermenigvuldigen met de bewezen reserve aan rijke uraniumertsen van de Verenigde Staten – een goed onderzocht land met een geolo-

gische verscheidenheid die representatief is voor de hele wereld. Aanzienlijk meer uranium is te vinden in arme ertsen (percentage beneden 0,1). Er bestaan enorme geologische schildformaties met een uraniumpercentage rond 0,01. De hoeveelheid uranium daarin moet op miljarden tonnen worden gesteld. Maar het is twijfelachtig of deze voorraad winbaar is, gezien de grote hoeveelheid gesteente die moet worden weggegraven en verwerkt om het uranium af te zonderen. De hoeveelheid splijtingsenergie van het uranium per ton gesteente is daar vergelijkbaar met de hoeveelheid fossiele energie per ton steenkool; daarom noemt men deze hypothetische winning wel die van gele steenkool. Met gele steenkool wordt de energiebalans van de kernenergie wellicht onaantrekkelijk (9).

De nu gangbare kernreactoren halen niet alle energie uit het uranium die er feitelijk inzit. Een 1.000 MW(e)-centrale gebruikt 150 ton natuurlijk uranium per jaar. Het tegen het eind van deze eeuw voorziene vermogen in kernenergiecentrales van 400.000 MW(e) (zie figuur 5) noodzaakt de aanvoer van vierhonderd keer die 150 ton of 60.000 ton natuurlijk uranium per jaar. Bij een reserve van 4,8 miljoen ton hebben we dus een perspectief van tachtig jaar, bij de speculatieve reserves een perspectief van tweehonderdvijftig tot vijfhonderd jaar. Ook al zijn dit lange perioden – men bedenke dat de elektriciteitsopwekking nauwelijks honderd jaar oud is –, toch rechtvaardigen ze een grootschalige uitbouw van de kernenergie niet. Wat heb je aan een systeem van duizenden in plaats van honderden kerncentrales, als na enkele tientallen jaren de splijtstof op is? Het èchte perspectief wordt daarom gegeven door reactoren die in staat zijn veel meer energie uit het uranium te halen dan de nu gangbare reactoren. We stipten al even de ontwikkeling aan van convertoren en kweekreactoren, waarin bijna-splijtbare (fertile) atoomkernen door neutronvangst worden omgezet in splijtbare (fissile) atoomkernen. Men rekent erop dat hierdoor vijftig- tot zeventigmaal méér energie kan worden geproduceerd, wat een perspectief geeft van duizenden jaren van toepassing op grote schaal. Wat zijn de vooruitzichten van deze ontwikkeling?
Kernreactoren met een optimaal gebruik van de splijtingsenergie in uraniumkernen zijn sinds het begin van de jaren zeventig in bedrijf. (Overigens zijn ze al sinds de jaren veertig in onderzoek.) Achtereenvolgens werden opgestart de BN-350 bij Shevschenko (Rusland) in 1973, de Phénix-240 bij Marcoule (Frankrijk) in 1973, de PFR-250 bij Dounreay (Schotland) in 1976 en de BN-600 bij Sverdlovsk (Rusland) in 1980 (de getallen geven het elektrisch vermogen in MW). Al deze reactoren hebben getoond dat de grootschalige aanmaak van splijtbare kernen uit natuurlijk uranium goed gecombineerd kan worden met het versplijtingsproces. Bij de Phénix heeft men feitelijke kweek gewenst en geconstateerd: er werden 1,16 maal zoveel splijtbare kernen gevormd als er splijtbare kernen werden verspleten. In aanbouw zijn momenteel de Super Phénix-1200 bij Creys Malville (Frankrijk), die gereed zal zijn in 1983, en de SNR-300 bij Kalkar (Bondsrepubliek), die gereed zal zijn in 1984. Bij de laatste wordt in eerste instantie praktisch volledige conversie, maar nog geen kweek nagestreefd. Vergevorderde plannen bestaan voor de Monju-300 bij Tsuruga (Japan) en de Clinch River-350 bij Oak Ridge (Verenigde Staten), die waarschijnlijk in de loop van de jaren tachtig gereed zullen komen. In alle acht gevallen gaat het om natriumgekoelde snelle reactoren – een reeds goed ontwikkelde en beheerste technologie. Het valt nog niet te zeggen of deze reactoren economisch aantrekkelijk kunnen worden. Hoge kapitaallasten, opgeschroefd door bouwrenteverliezen gedurende de langgerekte vergunningsprocedures, maken de SNR-300 verliesgevend. Voor de Super Phénix-1200, die zonder vertragingen gebouwd wordt, is het economisch perspectief echter beter.
Naast de natrium-gekoelde snelle reactoren bestaat de mogelijkheid van efficiënte conversie met thermische reactoren. Dit zijn dan geen uraniumreactoren, maar thoriumreactoren, waarin thorium-232 wordt omgezet in het splijtbare uranium-

233 (met hulp van splijtingsneutronen uit uranium-235). Experimentele reactoren van dit type, waarvan de KEMA-suspensie-testreactor een voorbeeld was, hebben gesuggereerd dat ze rendabel zijn, mits niet tot kweken geforceerd. Vanwege het ontbreken van het kweekperspectief en ook door een aantal technologische problemen is de ontwikkeling hiervan voorlopig tot stilstand gekomen. In feite kunnen we ook de fusiereactoren tot de convertoren rekenen. Hierin wordt immers uit lithium-6 na neutronvangst tritium gevormd, wat na versmelting met het overvloedige deuterium veel energie levert. Maar van fusiereactoren weten we nog niet of ze echt gerealiseerd kunnen worden. Hun eventuele ontwikkeling zal nog veel tijd vergen en het moment van grootschalige toepassing ligt waarschijnlijk na 2030. Hybridische reactoren, waarin zowel splijting van zware kernen als versmelting van lichte kernen optreedt, zullen wellicht eerder worden toegepast dan zuivere fusiereactoren.

Gelet op de ervaring met natrium-gekoelde snelle reactoren, die men de tweede generatie splijtingsreactoren kan noemen na de nu gangbare eerste generatie van thermische lichtwaterreactoren, moet men concluderen dat duizenden jaren van grootschalige toepassing geen hersenschim zijn. Het potentieel is er. De technologie is er. Kan een dergelijke, praktisch oneindige energiebron niet voor meer doelen worden gebruikt dan alleen het opwekken van elektriciteit? Wat is het potentieel van de toepassing?
Kernenergie onderscheidt zich op drie karakteristieke punten van andere energiebronnen. Ten eerste is de energiedichtheid van de splijtstof zeer groot, wat betekent dat veel energie makkelijk kan worden vervoerd en opgeslagen. Ten tweede kan de versplijting plaats vinden zonder dat lucht of andere stoffen van de omgeving nodig zijn. Ten derde is de energie bij kernsplijting groter dan bij chemische verbranding, zodat zeer hoge temperaturen en dus hoge thermodynamische rendementen bereikt kunnen worden. Deze karakteristieke punten suggereren andere toepassingen dan alleen in kerncentrales. We noemen de aandrijving van onderzeeschepen en ruimtevaartuigen, de gelijktijdige opwekking van elektriciteit en warmte in geïsoleerde streken, en de chemische procestechniek bij hoge temperaturen. Verder hoeft het niet altijd rendabel te zijn om elektriciteit uit eenheden van 1.000 MW(e) (of meer) op te wekken. De lage vervoerskosten van splijtstof kunnen gaan concurreren met de transportverliezen van elektriciteit, terwijl een groot aantal eenvoudige, maar intrinsiek veilige kleine kerncentrales kan gaan concurreren (men denke aan de beschikbaarheid) met een klein aantal om veiligheidsredenen gecompliceerde grote kerncentrales. Tenslotte kan gedacht worden aan het benutten van de hoge-temperatuurwarmte, of ook weer elektriciteit, voor produktie van synthetische vloeistoffen en waterstofgas als brandstof voor het vervoer.

Realisatie van de kernenergie

Zoals op bijna elk gebied, bestaat er ook op dat van de kernenergie een verschil tussen potentie en realisatie. We zullen ons nu met dit verschil bezighouden, zonder overigens diep in te gaan op de maatschappelijke factoren die er aan ten grondslag liggen. Om het onderwerp verder te beperken richten we ons alleen op West-Europa, dat trouwens groot genoeg is om de diversiteit van de factoren te zien.
Tot West-Europa zullen we rekenen de tien landen van de Europese Gemeenschap en verder Finland, Zweden, Oostenrijk, Zwitserland en Spanje. Het maakt deel uit van gebied III van de IIASA-studie, dat wordt gekarakteriseerd door de combinatie van een hoge bevolkingsdichtheid, een ontwikkelde markteconomie en weinig natuurlijke hulpbronnen. Als geheel is het gebied in sterke mate afhankelijk van de invoer van grondstoffen, met name van energiedragers. Maar tegelijk is het nogal

heterogeen, zowel wat betreft hulpbronnen als in de mate van industrialisatie. Verder zijn de maatschappelijke en politieke systemen verschillend. Deze diversiteit komt tot uitdrukking in de snelheid waarmee de kernenergieprogramma's, die zijn opgezet om de afhankelijkheid van de olie-invoer te verkleinen, gerealiseerd worden. Voor de analyse van de volgende alinea baseren we ons op Goldschmidt (10).
De aanvankelijke penetratie is niet bepaald door technologische of economische factoren, maar door de maatschappelijke houding tegenover kernenergie. Thans is die houding negatief en sterk bepaald door het protest van milieugroepen en maatschappij-kritische groepen. Tien jaar en langer geleden was hij positief. De kritiek op kernenergie kwam sterk op in 1973, het jaar van de oliecrisis. Deze crisis was een sterke stimulans om de kernenergieprogramma's te versnellen, maar tegelijk een oorzaak van de economische teruggang die aan deze programma's hun doel schijnt te ontnemen. De kritiek kreeg politieke betekenis in die landen, waar kleine verschuivingen bij verkiezingen voldoende zijn om van regering te veranderen. Het deed er daarbij weinig toe of het gecentraliseerde of gedecentraliseerde besturen zijn en of de elektriciteitsproduktie een staatsmonopolie is of een zaak van particuliere ondernemingen. Verder kreeg de kritiek de grootste politieke kracht in landen waar de energievoorziening er nog het beste voorstond. Zo vindt men na 1975 een sterke maatschappelijke rem op de verdere invoering van kernenergie in Zweden, Oostenrijk, Zwitserland, de Bondsrepubliek en Nederland. In het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, België en, in mindere mate, Spanje, was het daarentegen mogelijk om met de invoering goede voortgang te maken. Dat geldt zelfs voor Italië, waar de slechte energievoorziening sterker woog dan de bestuurlijke verlamming bij het vaststellen van vestigingsplaatsen voor centrales – om het even of het om kerncentrales of om conventionele centrales gaat.
Tabel II geeft een overzicht (11) van de thans in bedrijf of in aanbouw zijnde kerncentrales in West-Europa – met cijfers voor hun beschikbaarheid. Tabel III geeft het aandeel van de kernenergie in de elektriciteitsproduktie van 1979 (13) – door het in gebruik nemen van nieuwe centrales in Frankrijk is het percentage daar inmiddels boven de 40 gekomen, en evenzo is door de nieuwe centrales bij Gösgen en Caorso het percentage in Zwitserland gestegen tot 32 en in Italië tot 6. Deze tabellen zullen nu nader worden toegelicht.

Tabel II. Gegevens van kerncentrales in West-Europa.

	elektrisch vermogen in MW	in gebruik vanaf	belastingsgraad*) in %
België			
Doel 1	390	1975	86,4
Doel 2	390	1975	72,6
Doel 3	900	1982	
Doel 4	1000	1983	
Tihange 1	870	1975	67,5
Tihange 2	900	1982	
Tihange 3	1000	1984	
Bondsrepubliek Duitsland			
Neckar 1	805	1976	49,8
Neckar 2	805	1986	
Grafenrheinfeld	1225	1981	
Krümmel	1316	1982	
Hamm	296	1983	
Karlsruhe	52	1962	
Brokdorf	1290	1986	
Brunsbüttel	771	1977	0
Isar 1	870	1979	57,2

*) in 1979; alleen voor centrales boven 100Mw

	elektrisch vermogen in MW	in gebruik vanaf	belastingsgraad in %
Isar 2	1227	1988	
Obrigheim	328	1969	77,8
Philippsburg 1	864	1980	43,1
Philippsburg 2	1281	1984	
Gundremmingen B	1249	1983	
Gundremmingen C	1249	1983	
Stade	630	1972	75,6
Würgassen	640	1972	54,1
Esensham	1230	1979	80,6
Grohnde	1294	1984	
Biblis A	1146	1975	41,3
Biblis B	1240	1977	64,4
Kärlich	1227	1985	
Kalkar	295	1985	
Finland			
Loviisa 1	420	1977	74,2
Lviisa 2	420	1980	
Olkiluoto 1	660	1979	66,6
Olkiluoto 2	660	1980	
Frankrijk			
Creys-Malville	1200	1983	
Marcoule G2	40	1959	
Marcoule G3	40	1960	
Chinon 2	210	1965	66,7
Chinon 3	400	1967	47,0
Monts d'Arrée	70	1967	
St. Laurent des Eaux 1	460	1969	63,3
St. Laurent des Eaux 2	515	1971	36,9
Bugey 1	540	1972	65,3
Bugey 2	920	1979	52,7
Bugey 3	920	1979	68,7
Bugey 4	900	1979	75,9
Bugey 5	900	1979	0
Phénix	233	1973	64,2
Fessenheim 1	890	1977	76,3
Fessenheim 2	890	1978	66,8
Dampierre	900	1980	
Dampierre 2	900	1981	
Dampierre 3	900	1981	
Dampierre 4	900	1981	
Gravelines B1	920	1980	
Gravelines B2	920	1980	
Gravelines B3	920	1981	
Gravelines B4	920	1981	
Gravelines C5	920	1984	
Gravelines C6	920	1985	
Tricastin 1	920	1980	
Tricastin 2	920	1980	
Tricastin 3	920	1981	
St. Laurent des Eaux B1	880	1981	
St. Laurent des Eaux B2	880	1981	
Blayais 1	920	1981	
Blayais 2	920	1982	
Blayais 3	920	1982	
Blayais 4	920	1983	
Chinon B1	875	1982	
Chinon B2	875	1982	
Paluel 1	1285	1983	
Paluel 2	1285	1983	

	elektrisch vermogen in MW	in gebruik vanaf	belastingsgraad in %
Paluel 3	1285	1984	
Paluel 4	1285	1985	
Cruas 1	880	1983	
Cruas 2	880	1983	
Cruas 3	880	1984	
Cruas 4	880	1984	
St. Maurice St. Alban 1	1285	1984	
St. Maurice St. Alban 2	1285	1984	
Flamanville 1	1285	1985	
Flamanville 2	1285	1985	
Cattenom 1	1270	1985	
Cattenom 2	1270	1985	
Chooz	310	1967	61,4
Italië			
Latina	150	1964	56,1
Garigliano	150	1964	0
Trino Vercellese	247	1965	0
Cirene	40	1984	
Caorso	840	1978	25,8
Montalto di Castro 1	982	1985	
Montalto di Castro 2	982	1985	
Nederland			
Dodewaard	52	1969	
Borssele	443	1973	75,5
Spanje			
Asco 1	880	1981	
Asco 2	880	1982	
St. Maria de Garona	440	1971	43,6
Valdecaballeros 1	975	1986	
Valdecaballeros 2	975	1987	
Almaraz 1	930	1980	
Almaraz 2	930	1982	
Trillo	997	1986	
Vandellos 1	480	1972	76,1
Vandellos 2	982	1986	
Cofrentes	930	1982	
Lemoniz 1	900	1981	
Lemoniz 2	900	1983	
Jose Cabrera	153	1969	76,8
Verenigd Koninkrijk			
Berkeley 1	138	1962	60,9
Berkeley 2	138	1962	60,9
Bradwell 1	150	1962	27,7
Bradwell 2	150	1962	27,7
Trawsfynydd 1	250	1965	64,5
Trawsfynydd 2	250	1965	64,5
Dungeness A 1	275	1965	15,1
Dungeness A 2	275	1965	15,1
Sizewell A 1	290	1966	63,9
Sizewell A 2	290	1966	63,9
Hinkley Point A 1	250	1965	71,4
Hinkley Point A 2	250	1965	71,4
Oldbury 1	300	1968	64,4
Oldbury 2	300	1968	64,4
Wylfa 1	590	1971	45,8

	elektrisch vermogen in MW	in gebruik vanaf	belastingsgraad in %
Wylfa 2	590	1972	45,8
Hinkley Point B 1	625	1976	42,8
Hinkley Point B 2	625	1977	54,1
Dungeness B R21	600	1981	
Dungeness B R22	600	1982	
Hartlepool R1	625	1981	
Hartlepool R2	625	1982	
Heysham R1	625	1981	
Heysham R2	625	1982	
Heysham B1	660	1986	
Heysham B2	660	1987	
Hunterston A1	160	1964	90,3
Hunterston A2	160	1964	90,3
Hunterston B1	625	1976	33,6
Hunterston B2	625	1977	21,6
Calder Hall 1	50	1956	
Calder Hall 2	50	1956	
Calder Hall 3	50	1956	
Calder Hall 4	50	1956	
Chapel Cross 1	50	1958	
Chapel Cross 2	50	1958	
Chapel Cross 3	50	1958	
Chapel Cross 4	50	1958	
Windscale	32	1963	
Winfrith	92	1968	
Dounreay	250	1976	3,2
Zweden			
Oskarshamm 1	440	1972	76,3
Oskarshamm 2	570	1974	79,8
Oskarshamm 3	1060	1986	
Ringhals 1	750	1976	62,8
Ringhals 2	800	1975	50,4
Ringhals 3	900	1980	
Ringhals 4	900	1981	
Forsmark 1	900	1980	
Forsmark 2	900	1981	
Forsmark 3	1050	1985	
Barsebäck 1	570	1975	60,9
Barsebäck 2	570	1977	75,4
Zwitserland			
Mühleberg	320	1972	88,3
Leibstadt	942	1981	
Beznau 1	350	1969	84,7
Beznau 2	350	1972	90,7
Gösgen	920	1979	

Tabel III. Aandeel van de elektriciteitsproduktie door kerncentrales in 1979.

België	21,8%	Nederland	5,3%
Bondsrepubliek	11,3%	Spanje	6,3%
Finland	17,2%	Verenigd Koninkrijk	11,9%
Frankrijk	16,4%	Zweden	21,8%
Italië	1,4%	Zwitserland	24,7%

Opvallend is het beeld in Frankrijk, waar een technocratisch bewind zonder geduchte oppositie tot een goed samenhangend kernenergieprogramma heeft

geleid. Men moet daartoe rekenen de multinationale exploratie van uraniummijnen in Niger, de bouw van een grote uraniumverrijkingsfabriek bij Tricastin, de bouw van een splijtstofopwerkingsfabriek op de kaap La Hague en, natuurlijk, de vele tientallen kerncentrales volgens één model – een variant van de Westinghouse drukwaterreactoren –, aangevuld door de kweekreactoren Phénix en Super Phénix (14, 15). Daardoor is Frankrijk toonaangevend geworden in de kerntechnologie, niet alleen in West-Europa, maar in de hele wereld. Het ziet er niet naar uit dat de nieuwe Franse regering deze positie wezenlijk zal willen wijzigen. Tot de vruchten behoren hoogwaardige werkgelegenheid en verhoudingsgewijs lage elektriciteitstarieven. Dit contrasteert met het beeld van de Bondsrepubliek, die een minstens gelijkwaardig technologisch potentieel heeft als Frankrijk, maar waar bestuurlijke problemen de ontwikkeling op een achterstand hebben gezet. Men kan hier wijzen op het uitstel voor onbepaalde tijd van de bouw van een splijtstofopwerkingsfabriek annex -afvalopslag bij Gorleben, de uitzonderlijk trage vergunningsprocedure bij de bouw van de SNR-300 bij Kalkar en de jarenlange strijd om de Brokdorf-centrale, aan de bouw waarvan men nu begonnen is. Het Franse beeld contrasteert ook wat met dat van het Verenigd Koninkrijk, waar men besloten heeft af te stappen van de zelf ontwikkelde gasgekoelde reactoren en over te stappen op drukwaterreactoren. Dit noodzaakt een openbare hoorzitting over veiligheidsaspecten. Het klimaat daarvoor is zodanig dat de viering van het vijfentwintigjarig bedrijf van de Calder Hall-centrales is nagelaten.
Het nogal afwijkende beeld van Nederland kan grotendeels worden verklaard door de rol die het aardgas in de energievoorziening heeft gespeeld en die nu aan het aflopen is. De economische noodzaak van kernenergie wordt hier nu pas duidelijk, op een hoogtepunt van de maatschappelijke afwijzing ervan. In die situatie is het voornemen van de Nederlandse regering om kernenergie uit te bouwen (16) voorlopig onhaalbaar en wordt de maatschappelijke discussie van overheidswege gestructureerd voortgezet. Het vergelijkbare buurland België illustreert hoe de afwezigheid van een eigen energiebron tot een sterke groei van de kernenergie moest leiden. Bij voltooiing van de drie centrales in aanbouw zal hier de helft van de elektriciteit door kerncentrales worden opgewekt en er bestaan plannen voor nog meer kerncentrales. Ook in landen buiten de Europese Gemeenschap, waar de economische noodzaak duidelijk wordt gevoeld, blijkt de maatschappelijke aanvaarding voldoende voor een strak geconditioneerde groei. Dit geldt voor Zweden, met veiligheidaanpassingen van de Barsebäck-centrales, en voor Finland, met verscherpte veiligheidseisen voor verdere centrales. Het geldt ook voor Oostenrijk, waar de reeds enige tijd geleden voltooide Zwentendorf-centrale, bij referendum van 1978 niet in bedrijf genomen, mogelijk toch in bedrijf gesteld zal worden. In Zwitserland spant het er om of het omstreden Kaiseraugst-project in de naaste toekomst zal worden voltooid – hier wordt om een expliciete economische argumentatie gevraagd. Om nog even naar de Gemeenschap terug te keren: in Jutland is reeds een zouthorst onderzocht en goed bevonden voor de eindopslag van het splijtingsafval dat een eventueel Deens kernenergieprogramma zal opleveren. Overal geldt dat men zwaar tilt aan de afvalproblematiek. Niet alleen wordt de toekomstige afvalopslag nationaal aangepakt, maar ook wordt er hard aan gewerkt binnen het verband van de Europese Gemeenschap (17).

We stipten al even aan dat maatschappelijke ondersteuning of afwijzing alleen maar belangrijk is bij de aanvankelijke ontwikkeling, in de vorm van proefinstallaties en prototypes. Daarna worden politiek-economische factoren doorslaggevend. Waar de maatschappelijke factor zich onttrekt aan een modelmatige analyse, leent de economische factor zich daar goed voor. Marchetti en Nakicenovic (18) hebben opmerkelijke gelijkenissen gevonden in de marktpenetratie van steenkool, olie en aardgas. In vergelijking daarmee is de aanvankelijke penetratie

van kernenergie aan de snelle kant geweest, geholpen door een golf van maatschappelijke geestdrift. De tegenwoordige stagnatie kan als een tijdelijke correctie daarop gezien worden, effect van een golf van maatschappelijke scepsis. Maar uiteindelijk krijgt de beweging zijn eigen impuls. Er is iets onbevredigends in deze penetratiewet – alsof er geen (politieke) vrijheid zou bestaan om af te zien van kernenergie. Ook al is er geen sprake van een natuurwet, toch lijkt het er sterk op dat de (politieke) vrijheid hier beperkt is tot de begeleiding van het proces. Een samenleving kan en moet haar regels stellen aan de ontwikkeling, maar haar stoppen of terugdraaien kan ze niet. Een sociaal experiment om de kerncentrales voortijdig te sluiten, in de hoop maatschappelijke spanningen op te heffen met bewuste aanvaarding van de economische nadelen, zal dit inzicht alleen maar kunnen versterken – na enige tijd uiteraard. Dit betekent dat de spanningen, opgeroepen door angst voor en weerzin tegen een nieuwe technologie als kernenergie, onvermijdelijk zijn. Deze spanningen zijn niet uniek. Bijna alle grote veranderingen van de technologie in het verleden zijn bestreden met het oproepen van schrikbeelden. Men denke aan het protest van Rousseau tegen de voortbrengselen der wetenschap, die mensen van hun ware aard zouden vervreemden. Men denke aan Plato's pogen de grote spanningen van zijn tijd, waaronder hij leed, tegen te gaan door elke verandering stop te zetten. Beide waren vruchteloos (19, 20). Men kan nog verder in de tijd terugdenken en zich afvragen of de mythe van Prometheus, de mensenvriend die het vuur van de goden (=natuur) stal, van toepassing zou kunnen zijn op het kernfysische versplijtings'vuur'. Dit perspectief ontbreekt geheel aan Touraine's analyse (21) van de protestbeweging tegen kernenergie, die uniek en profetisch zou zijn.

We keren terug naar de feitelijke realisatie. Binnen de Europese Gemeenschap vindt politiek overleg plaats om de ontwikkeling meer in één richting te krijgen. Tenslotte delen alle landen de sterke afhankelijkheid van olie-invoer, die politieke nadelen heeft, en hebben ze met elkaar een omvangrijke kernindustrie opgebouwd (22). Men wil 'weg van de olie'. Volgens een recent besluit van de Ministerraad der Gemeenschap moet voor 1990 worden gestreefd naar 'beperking van het aardolieverbruik in de Gemeenschap op een niveau van ongever 40% van het brutoverbruik van primaire energie.' De Ministers sporen aan tot een beleid van besparingen, ontwikkeling van stromingsbronnen en vergrote steenkoolinzet. Ook sporen ze aan tot een voorzichtige verhoging van de kernenergieproduktie. In tabel IV wordt de te verwachten ontwikkeling weergegeven (23). Uit de toetsing van dit beleid aan het bovengenoemde besluit van de Ministerraad citeren we tenslotte het volgende:

Tabel IV. Aandeel van de olie in het verbruik van primaire energie (EEG).

	in miljoen ton		in procenten	
	1979	1990	1979	1990
België	25	30	52	48
Bondsrepubliek	142	143	51	40
Denemarken	16	13	77	53
Frankrijk	115	89	62	36
Griekenland	12	16	75	54
Ierland	6	9	74	65
Italië	96	117	71	59
Luxemburg	1	2	33	36
Nederland	31	45	45	49
Verenigd Koninkrijk	93	99	42	40

Tot de landen die volgens de vooruitzichten voor 1990 de 40%-grens nog niet bereiken behoren België, Denemarken, Griekenland, Ierland en Nederland. Deze gevallen moeten echter afzonderlijk worden onderzocht.
In België wordt verwacht dat de absolute behoefte aan aardolie tot 1990 aanzienlijk zal stijgen. Als één van de mogelijk zwakke plekken in de Belgische energiebalans van de jaren tachtig blijkt vooral een te geringe omschakeling op vaste brandstoffen (toeneming slechts van 11,4 naar 13 miljoen ton-equivalenten). Met betrekking tot de structuur van het Belgische eindgebruik van energie valt vooral de bovenmatige toeneming van het olieverbruik in de industriesector op: van 3 miljoen ton in 1979 tot 7 miljoen ton in 1990. Ook in de huishoudelijke sector blijft het olieverbruik tot 1990 op een tamelijk hoog niveau. Het Belgiche olieaandeel ligt in deze verbruikssector in 1990 met ruim 44% duidelijk boven het EG-gemiddelde (31%).
Denemarken stelt aanzienlijke pogingen in het werk om zijn zeer sterke afhankelijkheid van de olie te verminderen (1979: 77%, het hoogste aandeel binnen de Gemeenschap). Die pogingen zijn: *1* vermindering van de behoefte aan ingevoerde olie in 1990 met 30% (= 4,6 miljoen ton); *2* verhoging van de invoer van vaste brandstoffen met bijna 8 miljoen ton-equivalenten; *3* opbouw van een uit eigen bronnen gevoed aardgasnet; *4* uitbreiding van de stadsverwarming. Tot de minder gunstige aspecten van de Deense energiebalans behoren het hoge olieverbruik in de industriesector en het ontbreken van programma's voor het gebruik van kernenergie.
Ook Griekenland werkt, evenals Denemarken, aan een aanzienlijke verlaging van zijn zeer sterke afhankelijkheid van de olie, nl. van 75% naar 54%. Dit resultaat is bijna uitsluitend gebaseerd op het kolenbeleid, dat met name voor 1990 streeft naar een verdrievoudiging van de nationale produktie tot 9,5 miljoen ton-equivalenten. De zwakke plekken van de Griekse energiebalans voor 1990 zijn vooral gelegen in *1* De nog steeds sterke toename van het olieverbruik met bijna 40%. *2* Het weliswaar afnemende, maar nog steeds aanzienlijk boven het gemiddelde van de Gemeenschap liggende aandeel van het olieverbruik in zowel de industriële als in de huishoudelijke sector. *3* Het afzien van de primaire energiebron aardgas. *4* Een te geringe toepassing van de kernenergie. *5* De geringe binnenlandse produktie van koolwaterstoffen, die doen twijfelen aan de doeltreffendheid van de exploratie.
Het is in Ierland weliswaar de bedoeling het aandeel van de olie tegen 1990 te verminderen tot minder dan 65%, maar de maatregelen om de olie te verdringen lijken over het algemeen nog niet voldoende. Er wordt een aanzienlijke toeneming van het gebruik van kolen beoogd, maar hier staan verschillende negatieve factoren tegenover. *1* De invoer van olie moet met meer dan 50% worden verhoogd. *2* Uit de relatief hoge toename van het energieverbruik kan worden geconcludeerd dat – ondanks de recente intensivering van de politiek ten aanzien van energiebesparing – deze slechts een aarzelende uitwerking heeft. *3* Met ongeveer 67% blijft het verbruik van olie in de industriële sector tot 1990 buitengewoon hoog; slechts het relatieve aandeel zal dalen. *4* Ook Ierland behoort tot de landen die tot nu toe geen gebruik maken van kernenergie. Bij een totale beoordeling van de Ierse energiepolitiek moet evenwel ook rekening worden gehouden met de specifieke inspanningen van het land met betrekking tot het industriebeleid.
Italië vertoont voor 1990, met 54 tot 59%, na Ierland het hoogste aandeel van het olieverbruik binnen de Gemeenschap. Toch is het nieuwe Italiaanse energieprogramma in verschillende opzichten zeer ambitieus. *1* Grootscheepse energiebesparingsmaatregelen, waardoor de oliebehoefte met 20 miljoen ton wordt verminderd in 1990. *2* Sterke stijging van het gebruik van kolen. *3* Verdere intensieve uitbreiding van de aardgasvoorziening. *4* Aanzien-

lijke vooruitgang bij het gebruik van kernenergie. De werkelijke realiseerbaarheid van deze plannen kan echter niet zonder scepsis worden bekeken – alleen de toekomst zal hierover meer duidelijkheid kunnen brengen.
Als enig land van de Gemeenschap heeft Nederland voor 1990 een toeneming op het programma staan van niet alleen de absolute olie-invoer, maar ook van het relatieve aandeel van het olieverbruik boven de 40%-grens. De Nederlandse ontwikkeling is daarmee – ondanks grote eigen aardgasvoorraden en een dientengevolge gunstiger uitgangspositie dan andere landen – lijnrecht in tegenspraak met de politiek van de Gemeenschap van 'weg van de olie'.
De punten uit de Nederlandse energiebalans die nauwelijks te verenigen zijn met de niet aangevochten beleidslijnen van de Gemeenschap, of die in elk geval toch ernstige vragen oproepen, kunnen als volgt worden samengevat: *1* Ondanks de voorgenomen verhoging een te geringe omschakeling op kolen met 9 tot 11,5 miljoen ton-equivalenten in 1990 (ter vergelijking: Denemarken 8 miljoen, Frankrijk 27 tot 32 miljoen, Italië 29 miljoen ton-equivalenten). *2* Stagnatie van het gebruik van aardgas, daling van de Nederlandse aardgasproduktie tot 1990 met meer dan 25%. *3* Sterke toeneming van het olieverbruik in de industriële sector, in het bijzonder bij niet-energetisch verbruik, tot een aandeel van 45 tot 52% (gemiddelde over de Gemeenschap 25 tot 28%). *4* Hoog en verder toenemend gebruik van olie voor de opwekking van elektriciteit. *5* Stagnatie van het gebruik van kernenergie op een zeer laag peil; uitbreiding hiervan kan het geringe aandeel in de elektriciteitsopwekking (20% in 1990 mits de plannen voor 3.000 MW(e) inderdaad gerealiseerd worden) op een met andere landen vergelijkbaar niveau brengen (het gemiddelde in de Gemeenschap voor 1990 is 35%). Daardoor wordt het mogelijk het olieverbruik te beperken en tot een zinvoller gebruik van de aardgasvoorraden te komen.

Referenties

(1) D. Meadows, *Rapport van de Club van Rome,* Het Spectrum, Utrecht 1972.

(2) P. Desprairies, *Report on Oil Resources*, World Energy Conference, Londen 1977.

(3) W. Häfele, *Energy in a Finite World: a Global Systems Analysis* (IIASA), Ballinger, Cambridge Mass. 1981.

(4) U. Colombo & O. Bernardini, *Low Energy Growth 2030 Scenario and the Perspective for Western Europe*, EEG, Brussel 1979.

(5) A.B. Lovins, Enegery Strategy: the Road not Taken (in: *Future Strategies for Energy Development*), Oak Ridge 1976.

(6) H. Walz, *Energie und Gesellschaft,* World Energy Conference, München 1980.

(7) *World Uranium – Geology and Resource Potential* (ad-hoc commissie van de OECD en het IAEA), Freeman, San Francisco 1980.

(8) *Fuel and Heavy Water Availability*, INFCE, IAEA, Wenen 1980.

(9) J.W. Storm van Leeuwen, *Tussen Kernenergie en Kolen,* Ekologiese Uitgeverij, Amsterdam 1980; zie ook Hoofdstuk 26.

(10) B. Goldschmidt, *Le Complex Atomique*, Fayard, Parijs 1980.

(11) *Power Reactors in Member States,* IAEA, Wenen 1980.

(12) Nuclear Station Achievement, *Nuclear Engineering International*, september 1980.

(13) *Characteristic Operation Data of Nuclear Power Stations,* Centre Européen Luxemburg 1980.

(14) *l'Industrie Nucléaire Francaise,* CEA, Parijs 1977.

(15) *De snelle ontwikkeling van kweekreactoren in Frankrijk,* Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Den Haag 1978.

(16) *Regeringsnota Energiebeleid,* Deel 3, Staatsuitgeverij, Den Haag 1980.

(17) *Community action in radioactive waste management,* EEG, Brussel 1981; bevat verdere referenties.

(18) C. Marchetti & N. Nakicenovic, *The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model,* IIASA, Laxenburg 1979.

(19) R.F. Beerling, *Het Cultuurprotest van J.-J. Rousseau,* Van Loghum Slaterus, Deventer 1977.

(20) K.R. Popper, *The Open Society and its Enemies,* Routledge & Kegan Paul, Londen 1966.

(21) A. Touraine, *La Prophétie Anti-Nucléaire,* Seuil, Parijs 1980.

(22). *The Nuclear Power Industry in Europe,* FORATOM – Deutsches Atomforum e.V., Bonn 1978.

(23) *Doelstellingen voor het Energiebeleid tot 1990,* EEG, Brussel 1981.

24. ATOOMGELEERDEN, KOOPLUI EN DOMINEES

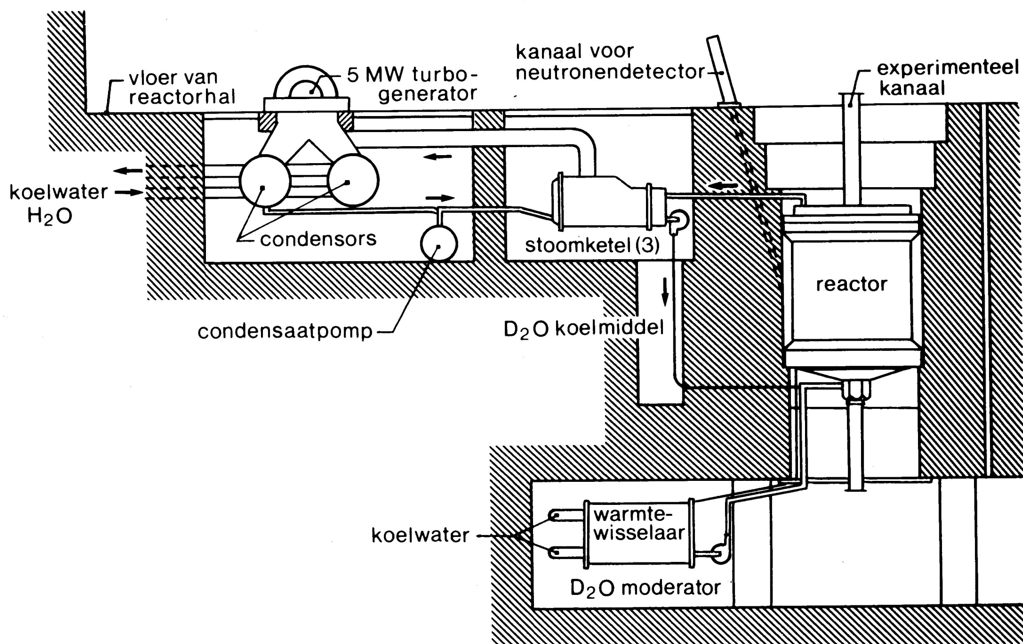
J.A. Goedkoop

In Nederland is de ontwikkeling van kernenergie nogal anders verlopen dan in de omringende landen. Rond 1950 gestart met een voorsprong - alleen in Engeland was men verder -, zijn we thans ver achter geraakt. Dit hoofdstuk probeert aan te geven welke politieke, economische en maatschappelijke factoren daarvoor verantwoordelijk zijn geweest. Politieke - omdat het de overheid was, die in de jaren vijftig het voortouw van de ontwikkeling heeft genomen met het stichten van het Reactor Centrum Nederland en vervolgens haar beleid steeds heeft aangepast aan veranderende inzichten in de rol van de kernenergie. Economische - omdat in de zestiger jaren goedkope olie en een enorme aardgasvoorraad het perspectief van de kernenergie deden verbleken. Maatschappelijke - omdat de Nederlandse variant van de anti-kernenergiebeweging in de jaren zeventig een hevig karakter kreeg. De werking van deze factoren wordt toegelicht aan de hand van een groot aantal programma's en projecten, die voor het merendeel zijn mislukt.

Op 28 november 1951 kwam in Kjeller, even buiten Oslo, een internationaal gezelschap bijeen om er getuige van te zijn dat de Noorse koning een kernsplijtingsreactor in bedrijf stelde. De Nederlandse delegatie was groot en werd aangevoerd door de Minister van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen. Daarmee kwam tot uitdrukking dat deze reactor een gezamenlijke Noors-Nederlandse onderneming was, waartoe ons land een essentiële bijdrage had kunnen leveren dankzij de vooruitziende blik van een Leids hoogleraar in de natuurkunde, W.J. de Haas. Op zijn aandringen had de regering in 1939, toen de kernsplijting nog maar net ontdekt was, enkele tonnen uraniumconcentraat gehamsterd. Daarmee waren Nederland en Noorwegen in één klap niet alleen vergelijkbare landen zoals België en Zweden voorbijgestreefd, maar ook Frankrijk, dat vóór de bezetting helemaal vooraan had gelegen, nu echter alleen nog maar een reactor had met een fractie van het vermogen dat in Kjeller kon worden bereikt. De Duitsers waren politiek nog uitgeschakeld; in West-Europa waren alleen de Britten verder.
In het volgende zal worden nagegaan hoe, beginnend met deze voorsprong, de reactortechnologie zich in Nederland verder heeft ontwikkeld. Hoe, met andere woorden, de 'atoomgeleerden' zoals die weldra in hun witte jassen rond de reactor in Kjeller te zien waren, zijn gevaren tussen de kooplieden en dominees waardoor hun land, volgens sommigen, voornamelijk bevolkt wordt.

De jaren vijftig: steenkool en uranium

Nu was in de beginjaren de afstand tussen wat er in Kjeller werd verricht en de praktische toepassing daarvan in Nederland niet alleen geografisch groot, maar ook bestuurlijk. De Nederlandse deelneming werd gedragen door de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), die direct na de oorlog was opgericht om het natuurkundig onderzoek te bevorderen, allereerst bij de universiteiten. De FOM-vertegenwoordigers bij de officiële ingebruikneming, maar ook in de commissie die in de volgende jaren het gemeenschappelijk laboratorium bestuurde, waren



Figuur 1
Principeschets van de reactor die in 1954 in Noorwegen was ontworpen voor de bouw in Nederland. De stoom zou worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Zoals in de tekst vermeld, is hieruit de reactor voortgekomen die thans in Halden staat. Deze levert stoom aan een papierfabriek.

---

dan ook merendeels hoogleraren die zich in de eerste plaats interesseerden voor de fysische aspecten van de reactor en het gebruik daarvan voor wetenschappelijk onderzoek. De gedachte dat deze de voorloper zou moeten zijn van een stoommachine waarmee een elektrische generator kon worden aangedreven leefde bij hun minder sterk dan bij hun Noorse collega's. Dat had eigenlijk andersom moeten zijn, want in Noorwegen stroomde toen nog heel wat water ongebruikt van de bergen af, terwijl in Nederland de energievoorziening reden tot zorg gaf.
Afgezien van de groeiende behoefte voor het vervoer was deze geheel gebaseerd op steenkool. Het viel echter niet te verwachten dat de winning daarvan in Limburg gelijke tred zou kunnen houden met de stijging van de vraag door industrialisering en toenemende levensstandaard. Het besef dat import van steenkool dan een sterk beslag zou gaan leggen op de betalingsbalans deed geleidelijk het inzicht groeien dat er voor de toekomstige energievoorziening naar nieuwe mogelijkheden moest worden gezocht. Het accent kwam daarbij op de kernenergie te liggen nadat President Eisenhower eind 1953 zijn *Atoms for Peace*-plan had ontvouwd, dat alom een soort 'atoomkoorts' deed ontstaan.
Toen de regering in 1954 dan ook een wetsvoorstel indiende om de FOM financieel in staat te stellen in Nederland een reactor te bouwen die in Kjeller was ontworpen en die inderdaad stoom zou produceren, verlangde de Tweede Kamer dat, gezien het potentiële belang van de kernenergie, daarvoor een nieuwe organisatie zou

worden opgericht. Aldus kwam midden 1955 de Stichting Reactor Centrum Nederland tot stand, waaraan behalve de Staat en de FOM ook de elektriciteitsproduktiebedrijven en de industrie deelnamen.
Inmiddels waren de plannen alweer veranderd, vooral doordat een tweede reactor was bedacht door de KEMA in Arnhem, die vanaf het begin vertegenwoordigd was geweest bij de Noors-Nederlandse samenwerking. Het in dat kader opgestelde ontwerp ging uit van wat men in Kjeller had: staven van metallisch uranium, geplaatst in een vat met zwaar water, met dien verstande dat in het nieuwe ontwerp temperatuur en druk aanzienlijk hoger zouden zijn. In Arnhem meende men dat onder die omstandigheden de levensduur van zulke staven kort zou zijn. Men wilde ze daarom vervangen zien door buizen waardoorheen een suspensie van splijtstof in zwaar water zou circuleren.
De elektriciteitsbedrijven hadden daarom geen behoefte aan het oorspronkelijk door de FOM voorgestelde project; wel aan een reactor die zelf geen nuttige energie behoefde te produceren, maar die men zou kunnen gebruiken om materialen en constructies voor vermogensreactoren te beproeven. Ze vonden bondgenoten in FOM-kringen, waar men een dergelijke materiaalbeproevingsreactor zou willen gebruiken als neutronenbron voor fysisch onderzoek. Het resultaat van dit alles was dat

- in Kjeller verder werd gewerkt aan het ontwerp van de stoomproducerende zwaarwaterreactor die, in gewijzigde vorm, voor Noorse rekening in Halden werd gebouwd en later ingebracht in een project van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO);
- de eerste letter van de afkorting RCN niet kwam te slaan op deze reactor, maar op een in de Verenigde Staten gekochte materiaalbeproevingsreactor, die in Petten werd neergezet; en
- in Arnhem met geld van het RCN een laboratorium werd opgericht voor het suspensie-onderzoek en later werd begonnen aan de bouw van de KEMA suspensietestreactor (KSTR).

Terwijl deze stoelendans plaatsvond was ook de Nederlandse energiesituatie aan het veranderen. Aardolie uit het Midden-Oosten werd goedkoop en in 1958 lagen er miljoenen tonnen steenkool onverkocht in Limburg. Nog een paar jaar later bleek Nederland een gigantische rijkdom aan aardgas te bezitten. De kolenmijnen werden gesloten en de kernenergie werd van een hoop een bedreiging. Immers, zoals de nieuwe fossiele energiebronnen de investeringen in de steenkoolmijnen waardeloos hadden gemaakt, zo zou de kernenergie het aardgas kunnen verdringen. Het werd daarom zaak dit zo snel en zo goed mogelijk te gelde te maken.

De jaren zestig: aardgas en kernreactoren

Toch betekende dit niet het einde van de bereidheid van de overheid het onderzoek van de kernenergie te steunen. Er kwam namelijk omstreeks 1960 een ander motief naar voren: het scheppen van nieuwe mogelijkheden voor de Nederlandse fabrikanten van energie-apparatuur, los van de vraag of die in Nederland dan wel daarbuiten zou worden gebruikt. Die fabrikanten hadden nooit kunnen beschikken over een gegarandeerde thuismarkt. Met name de (meest provinciale, soms gemeentelijke) elektriciteitsbedrijven hadden zich altijd op het standpunt gesteld dat het hun taak was de gebruikers goed en goedkoop van elektriciteit te voorzien. Zij hadden alleen op die basis hun installaties in binnen- en buitenland gekocht.
Met de nadering van de kernenergie, die ongetwijfeld gepaard zou gaan met een toenemende grootte per eenheid, achtte de overheid de tijd gekomen zich met deze tot nu toe geheel vrije markt in te laten. De nieuwe Kernenergiewet voorzag in een Industriële Raad voor de Kernenergie (IRK) waarin de beide partijen vertegenwoordigd waren. In dit gezelschap werd getracht te komen tot afspraken voor de

levering van toekomstige kerncentrales. Ook adviseerde deze IRK over de besteding van geld, waarover de Minister van Economische Zaken kreeg te beschikken voor de stimulering van de nucleaire industrie. Middelen van dit Ministerie, veelal in combinatie met steun van de inmiddels opgerichte Europese Gemeenschap voor Atoomenergie, vloeiden onder andere naar

a. de ontwikkeling, met het zwaartepunt bij RCN, van een drukwaterreactor geschikt voor de voortstuwing van een koopvaardijschip;

b. de bouw in Arnhem van de KSTR;

c. de ontwikkeling, begonnen bij de FOM, later voortgezet door het RCN, van de gascentrifuge voor de scheiding van uranium-isotopen;

d. de bouw van de kerncentrale Dodewaard, waartoe in de Verenigde Staten ook het ontwerp en de fabricagekennis werden gekocht, zodat niet alleen de elektriciteitsbedrijven een object kregen om met de kernenergie vertrouwd te raken, maar ook Nederlandse bedrijven belangrijke componenten (drukvat, pompen, splijtstofelementen) konden maken;

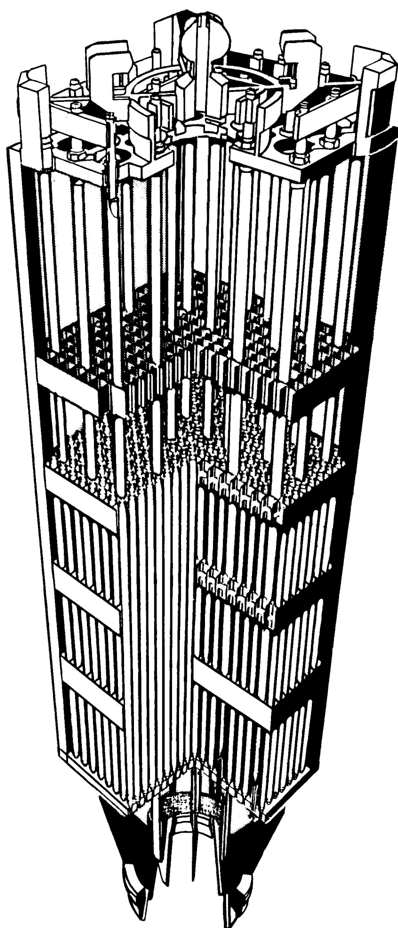
e. Nederlandse deelname aan het DRAGON-project in Engeland (gericht op de ontwikkeling van de gasgekoelde reactor) en aan Eurochemie in België, welke projecten beide onder auspiciën van de OESO tot stand waren gekomen. Vooral bij Eurochemie kon Nederland een belangrijke technische inbreng hebben doordat in Kjeller ervaring werd opgedaan met de opwerking van afgewerkte splijtstof uit de Noors-Nederlandse reactor.

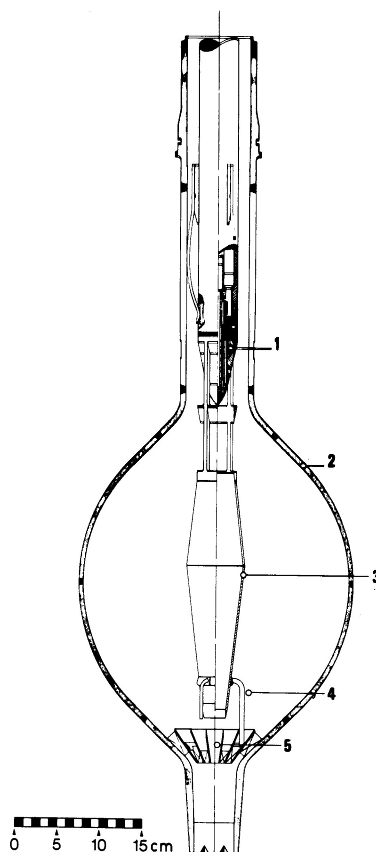
Kalkar en industriële innovatie

Enkele dagen nadat op 26 maart 1969 de kerncentrale Dodewaard door de Koningin officieel in gebruik was gesteld werd bekend dat de Provinciale Zeeuwse Energie Maatschappij de opdracht voor de veel grotere kerncentrale te Borssele had gegund aan een Duits bedrijf. Ook al kregen Nederlandse ondernemingen uiteindelijk toch een groot aandeel in de bouw, de verwachtingen voor wat betreft de rol van de eigen industrie bij de verdere invoering van kernenergie in Nederland kregen een gevoelige knauw. Toen spoedig daarna de tweede splijtstoflading voor Dodewaard ook in het buitenland werd besteld trok Philips, dat bij de levering van de eerste een uitstekende prestatie had geleverd, zich terug uit de splijtstofelementenfabricage.

Intussen was er echter een nieuw thema voor industriële activiteiten ontstaan: de natriumgekoelde snelle kweekreactor. Contacten die door TNO en de industrie waren gelegd leidden in 1967 tot een samenwerking met de Bondsrepubliek en België (en aanvankelijk ook Luxemburg), die er op was gericht dat reactortype gezamenlijk tot ontwikkeling te brengen. Dit plan vond een goed onthaal bij de regering: de Nederlandse industrie mocht dan de boot gemist hebben bij de invoering van de watergekoelde vermogensreactoren, zij zou nu nog net op de trein van de natriumgekoelde reactoren kunnen springen. Een voorstel van het RCN om op basis van het werk in de afgelopen jaren in Petten een prototype scheepsreactor te bouwen werd afgewezen en het programma werd sterk gericht op deelneming aan het DeBeNeLux-onderzoek. Dat zou vooral betrekking hebben op de reactor zelve; de Nederlandse apparatenindustrie daarentegen ging zich richten op de fabricage van pompen, warmtewisselaars en andere componenten van het koelsysteem. Om die te kunnen beproeven werd in Hengelo een groot natriumcircuit gebouwd.

Los van het DeBeNeLux-project begon na 1970 het ontwikkelingswerk van de afgelopen jaren in twee sectoren vruchten af te werpen. De Rotterdamse Droogdok Maatschappij richtte een nieuwe fabriek in voor de bouw van reactordrukvaten, die een tijd lang goed voorzien was van orders en in Almelo werd begonnen met de bouw van een fabriek van gascentrifuges en een uraniumverrijkingsinstallatie waarin deze zouden worden toegepast.





Figuur 2
In 1970 maakte het ECN samen met een Nederlands bedrijf een offerte voor de tweede splijtstoflading van het Duitse koopvaardijschip Otto Hahn. Een splijtstofelement als hierboven afgebeeld werd gemaakt en beproefd. Uiteindelijk werd de opdracht aan een Duitse leverancier gegund, al hebben wel een aantal door het ECN gemaakte splijtstofstaven het schip helpen voortstuwen.

Figuur 3
Het reactorvat van de KEMA suspensietestreactor in Arnhem, waarin in 1976 kortstondig 1 MW aan warmte werd opgewekt.
***1* gasinblaaskop, *2* roestvrijstalen vat, *3* stromingsstabilisator, *4* ondersteuning van *3*, *5* instroomstuk van de suspensie.**

Het lag in de lijn van deze ontwikkeling dat de regering een commissie instelde die moest bekijken of het RCN zich nog niet meer zou kunnen richten op de behoefte van het Nederlandse bedrijfsleven op middellange termijn. Het rapport van deze commissie, waarin de latere toverwoorden 'industriële innovatie' een belangrijke rol speelden, vormde mede de basis voor de oprichting van de BV Interfuel die alsnog zou proberen in Nederland de fabricage van splijtstofelementen van de grond te krijgen. De technische grondslag daarvoor was de kennis die RCN en KEMA hadden, respectievelijk als bijprodukten van de ontwikkeling van de scheepsreactor en van het suspensiereactor-project.

1973: een keerpunt

Aldus was het nucleaire onderzoek in Nederland vrijwel geheel in dienst gesteld van de industriële ontwikkeling. Dat kerncentrales nog meer zouden kunnen bijdragen tot de Nederlandse energievoorziening was zeker niet vergeten, maar zolang affiches de burgers aanspoorden vaker een warme douche te nemen en benzinestations elkaar met geschenken de loef afstaken, werd dit geen urgente zaak geacht. Dat werd anders toen tegen het einde van 1973 de fenomenale prijsstijging van de aardolie inzette. Vrijwel gelijktijdig echter drong in Nederland de anti-kernenergiebeweging door die reeds jarenlang in het buitenland zichtbaar was geweest, maar die in Nederland een eigen karakter kreeg, passend in de traditie van de godsdienstige disputen van weleer. Weliswaar concentreerde de aandacht zich aanvankelijk vrijwel geheel op het Kalkar-project, maar toen in 1974 het kabinet-Den Uyl kwam met een Energienota waarin de mogelijkheid werd geopperd drie nieuwe kerncentrales te bouwen, richtte de oppositie zich weldra ook daartegen. Daarmee ontstond de impasse die tot de huidige dag voortduurt.
Aangezien de anti-kernenergiebeweging juist binnen het hoger onderwijs veel aanhang vond is het begrijpelijk dat ook het onderzoek toneel van strijd werd. De term 'energieonderzoek' vond ingang en betoogd werd dat dit veel te eenzijdig gericht was op de kernsplijting. Om allerlei hieruit voortvloeiende initiatieven te kanaliseren stelde de Minister voor Wetenschapsbeleid een landelijke stuurgroep energieonderzoek in, die voorstellen deed voor nationale energieonderzoek-programma's, waarbij met een grote boog om de kernenergie werd heengelopen. Daar kwam nog bij dat ook de industrie in een kwade reuk kwam te staan, zodat de politieke basis voor een industriële oriëntatie van het onderzoek snel wegsmolt.

De opengehouden optie

In de jaren die sinds 1973 zijn verlopen is op een aantal plaatsen het kernsplijtingsonderzoek stopgezet of sterk ingekrompen. In Arhem is de KSTR kortstondig in bedrijf geweest, waarna de ontwikkeling van de suspensiereactor werd beëindigd. De aandeelhouders van Interfuel gaven na enkele jaren de moed op, waarmee de kansen op fabricage van splijtstofelementen wel voor altijd bekeken zijn. Beter verging het de isotopenscheiding: weliswaar werd het Amsterdamse RCN-laboratorium waarin de centrifuge was ontwikkeld opgeheven, maar onderzoek en ontwikkeling op dit gebied werden in Almelo voortgezet. Van de drie onderzoekreactoren bij hogescholen, waarvan die in Eindhoven slechts korte tijd had gewerkt, werd nu ook die in Wageningen stilgelegd. Ook de stopzetting van twee OESO-projecten had gevolgen: met de ontbinding van Eurochemie verloor Nederland het contact met de splijtstofopwerkingstechnologie en met het DRAGON-project verdween het omvangrijke grafietonderzoek uit Petten. De bilaterale samenwerking met Noorwegen tenslotte, die inmiddels door uiteengroeiende interessen al een stuk was ingekrompen, kwam definitief ten einde door de sluiting van de Noors-Nederlandse Reactor School in Kjeller.
Uiteraard ging deze ontwikkeling niet ongemerkt voorbij aan het RCN. In 1976 werd het werkterrein uitgebreid en in overeenstemming daarmee werd de naam veranderd in Energieonderzoek Centrum Nederland. Voor wat betreft de kernsplijtingsenergie werd nu het devies 'openhouden van de optie' voor het geval er zou worden besloten meer kerncentrales in Nederland te bouwen. De oriëntatie op het bedrijfsleven, die zo kort geleden nog was nagestreefd, viel weg en de voornaamste afnemer van de door het ECN vergaarde en te vergaren kennis werd de overheid; meer speciaal die overheidsinstanties die verantwoordelijk zijn voor de veiligheid en de volksgezondheid bij de toepassing van kernenergie. Om, bij een slinkende inzet van mankracht, in deze nieuwe situatie toch adequaat te kunnen functioneren op het gebied van de kernsplijting, heeft het ECN er naar gestreefd

zoveel mogelijk contact te houden met die centra waar actief op dat gebied wordt gewerkt. Dat zijn allereerst de beide Nederlandse kerncentrales, waarvan het bedrijf met zich meebrengt dat materiaalmonsters in Petten moeten worden onderzocht en die ook gelegenheid bieden tot gezamenlijk onderzoek van nieuwe technieken op het gebied van de instrumentatie. Eveneens is van belang de Pettense materiaalbeproevingsreactor, die kort na de voltooiing was overgedragen aan de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie en die nu gezamenlijk wordt gebruikt door Nederland en de Duitse Bondsrepubliek. De aanwezigheid van deze hogefluxreactor brengt interessant materiaalonderzoek naar Petten, waar ook het ECN nieuwe inzichten aan ontleent. Daarnaast is er de deelname aan het OESO-project in Halden en de *Loss-of-Fluid Test* in Idaho, beide belangrijke onderzoekcentra op het gebied van de veiligheid van watergekoelde reactoren. Ook is het ECN nog betrokken bij de ontwikkeling van de snelle kweekreactor, al neemt de omvang van dit onderzoek gestaag af. Meer constante elementen vormen de ontwikkeling van technieken die worden toegepast bij de uitvoering van het Non-Proliferatie Verdrag en vooral de studie van methoden om kernsplijtingsafval veilig definitief op te bergen. Ook op die gebieden wordt intensief met buitenlandse instellingen samengewerkt. Zo doet het ECN experimenteel onderzoek naar de opberging van glasvormig kernsplijtingsafval in een zoutmijn in Nedersaksen.

Een kwestie van tijdschalen

Dit beknopte relaas van onderzoek en ontwikkeling op het gebied van de kernenergie in Nederland heeft een verontrustend aantal programma's en projecten doen zien die de eindstreep niet hebben gehaald: de bouw in Nederland van de in Kjeller ontworpen zwaarwaterreactor, de eveneens daar begonnen splijtstofopwerking, de ontwikkeling van de scheepsreactor en van de suspensiereactor en de fabricage van splijtstofelementen. Onvermeld bleef dat de fabricage van reactordrukvaten het slachtoffer werd van de wereldwijde malaise in de bouw van kerncentrales en dat uit de fabricage van natriumcomponenten de vaart is verdwenen door de uiterst trage vergunningverlening bij de bouw van de kerncentrale Kalkar. Eigenlijk heeft alleen de uraniumverrijking, verankerd in het *troika*-verband met Britse en Duitse ondernemingen, het industriële stadium kunnen bereiken. En zelfs voor deze activiteit, waarbij geen gevaar voor de volksgezondheid optreedt, is het niet uitgesloten dat hij uiteindelijk ten offer valt aan binnenlandse politieke manoeuvres. Dat geldt, als men de verkiezingsuitspraken ernstig neemt, in nog sterkere mate voor de beide, al jarenlang uitstekend functionerende kerncentrales.
Anderzijds moet niet worden geconcludeerd dat alle inspanningen vergeefs zijn geweest. In de eerste plaats heeft het onderzoek- en ontwikkelingswerk een groot aantal Nederlanders vertrouwd gemaakt met de kernreactor-technologie. Ook is er een moeilijk te kwantificeren uitstraling geweest naar het Nederlandse bedrijfsleven in de vorm van verbeterde fabricagemethoden, verbindings- en inspectietechnieken, programmatuur, kwaliteitsbewaking, enz. Het ECN is niet alleen een centrum geweest van onderzoek op het gebied van de kernenergie, maar heeft ook, zoals de oprichters voor ogen stond, de reactoren en andere faciliteiten waarover het kon beschikken van nut doen zijn voor onderzoek op gebieden buiten dat van de energievoorziening. Mede door de in Nederland betrekkelijk zeldzame vermenging van zuiver wetenschappelijk en toegepast onderzoek heeft het na de verbreding van doelstelling gemakkelijk kunnen overschakelen op onderzoek van niet-nucleaire energiesystemen, waarbij veelal niet alleen dezelfde mensen, maar ook dezelfde methoden worden ingezet als vroeger voor het nucleaire onderzoek.
Toch blijft de vraag waarom er niet meer is bereikt. Gaat men, om die vraag te beantwoorden, na waardoor telkens ontwikkelingen voortijdig zijn afgebroken, dan blijkt er meestal een combinatie van oorzaken te zijn. Enerzijds waren dat ver-

anderingen op de wereldenergiemarkt en in de technische inzichten in het buitenland. Aan de andere kant hebben steeds ook wisselingen in de opvattingen van de Nederlandse spraakmakende gemeente en daarmee van de politieke leidslieden een belangrijke rol gespeeld. Wat men daarbij constateert is dat de tijdschaal waarop deze wisselingen zich afspelen steeds korter is geworden in vergelijking met de tijdschaal die kenmerkend is voor het tot ontwikkeling en toepassing brengen van nieuwe technieken.

Inmiddels wijzen alle tekenen erop dat, na een periode waarin de zorg voor de Nederlandse energievoorziening voorop stond, thans het accent opnieuw zal komen te liggen op industriepolitieke overwegingen. Het woord innovatie, omstreeks 1973 tijdelijk verstomd, is al weer veel gehoord. Wat twintig jaar geleden gebeurde op het gebied van de kernenergie lijkt zich nu te herhalen voor andere energieapparatuur, zoals kolenconversiesystemen en windturbines.

De vraag die zich nu aandient is of het in Nederland, dat wijd open staat voor marktinvloeden en denkbeelden uit het buitenland, eigenlijk wel mogelijk is een nieuwe grootschalige techniek ingang te doen vinden. Een discussie over deze vraag, laat staan een beantwoording daarvan, valt buiten het bestek van dit artikel. Eén enkele les die men er wellicht uit kan distilleren is dat programma's die in onderlinge taakverdeling met buitenlandse instellingen worden uitgevoerd een wat grotere kans op voltooiing hebben dan puur nationale. Dit dankzij het feit dat wisselingen in opvattingen, en daarmee politieke ommezwaaien, in de verschillende landen meestal niet synchroon lopen, waardoor het effect ervan op de gang van zaken bij het onderzoek gedempt wordt. Het valt alweer buiten het kader van deze beschouwing of die les ook van toepassing is op de ontwikkelingen die thans voor de deur staan.

25. VIJFENTWINTIG JAAR ONDERWIJS IN DE KERNTECHNIEK

J.J. van Loef

In samenhang met de ontwikkeling, die in het voorgaande hoofdstuk is geschetst, is ook de studie van en opleiding in de kerntechnologie na een bijna grootse start in stagnatie geraakt. Tot nu toe werden op dit gebied ruim duizend Nederlanders academisch gevormd, vooral aan de Technische Hogeschool en het Reactor Instituut te Delft. De opleiding van het middelbaar en technisch kader heeft met name plaats gevonden bij het Reactor Centrum Nederland in Petten. Pogingen om elders experimentele faciliteiten, bestemd voor onderwijs en onderzoek, op te bouwen en in stand te houden zijn uiteindelijk niet gelukt. Gedurende de laatste jaren valt een duidelijke teruggang te constateren in het aantal studenten dat zich in de kernreactortechnologie wenst te bekwamen. Dit hangt zowel samen met de acties die tegen kernenergie gevoerd worden als met de vermindering van werkgelegenheid in de nucleaire industrie. Het gevaar bestaat dat de toekomstige vervanging van het vergrijzend personeel in dit vakgebied door bekwame jongeren moeilijk zal worden.

Inleiding

De eerste door de Verenigde Naties in 1955 in Genève belegde conferentie over de vreedzame toepassingen van de atoomenergie betekende een belangrijke stimulans voor het scheppen van opleidingsmogelijkheden in de kernreactortechnologie. De bestaande onderwijsinstellingen waren hiervoor niet geëquipeerd, aangezien de mensen die toen met de kernenergie vertrouwd waren in hoofdzaak werkzaam waren in gespecialiseerde overheids- en industriële laboratoria, meestal ver gelegen van de bevolkingscentra, en soms nog bezig in de sfeer van (militaire) geheimhouding. De verspreiding van kennis en ervaring van de deskundigen naar de onderwijsinstellingen toe was mede daardoor nog maar weinig op gang gekomen. In Nederland organiseerde de Technische Hogeschool te Delft in hetzelfde jaar de eerste van een serie leergangen over kernreactortechnologie met voornamelijk docenten van elders. De eerste – buitengewone – leerstoel in de reactorkunde werd in 1956 aan de afdeling der technische natuurkunde van de TH Delft ingesteld, en daarin werd benoemd dr. J.J. Went, chef van het researchlaboratorium van de NV KEMA in Arnhem.
Intussen waren in enkele centra voor nucleair onderzoek, gelegen in om ons heen liggende landen en de Verenigde Staten, speciale reactorscholen opgericht, waarvan de Harwell Reactor School één van de bekendste was. Waren deze opleidingsinstituten oorspronkelijk alleen toegankelijk voor belangstellenden uit het eigen land, weldra werden zij tevens opengesteld voor buitenlanders. Van de mogelijkheid om bijvoorbeeld de cursus *Nuclear Engineering* te volgen, werd dan ook door een aantal Nederlanders gebruik gemaakt. Het inmiddels in 1955 opgerichte Reactor Centrum Nederland (RCN) en het Noorse Instituut voor Atoomenergie namen in het kader van hun samenwerkingsverband JENER* in Kjeller het initiatief tot oprichting van de Nederlands-Noorse Reactorschool in 1958 (1). Deze school heeft de afgelopen twintig jaar een bijzonder nuttige functie vervuld, niet alleen door het grote aantal keren dat de standaardcursus *Fundamentals of Nuclear Engineering* (bijgewoond door 354 deelnemers, van wie 145 uit Nederland) werd gegeven, maar

* *Joint Establishment for Nuclear Energy Research*

ook door de organisatie van een groot aantal gespecialiseerde cursussen, waaraan in totaal door 1.327 mensen, van wie 10% uit Nederland, werd deelgenomen. In 1980 is deze Nederlands-Noorse Reactorschool opgehouden te bestaan, aangezien hiervoor door de aanwezigheid van opleidingsmogelijkheden in Nederland zelf weinig behoefte meer bestond.
In het hierna volgende beknopte overzicht over het onderwijs in de kernreactortechnologie in Nederland komen de volgende onderwerpen ter sprake: academische opleidingen, hun ontstaan en de globale inhoud en de betekenis ervan; (inter) universitaire kernreactoren; opleiding van het middelbaar en hoger technisch kader en tenslotte een terugblik en perspectieven. Er zal niet op het onderzoek worden ingegaan, waaraan door studenten van universiteiten en hogescholen is deelgenomen en waarin voor hen een belangrijk stuk opleiding verscholen zit. De mogelijkheden die in dit verband aanwezig zijn op het gebied van de radio- en de stralingschemie, alsmede van de reactor- en stralingsfysica en hun toepassingen zullen, gezien de titel van deze bijdrage en de beperkingen in ruimte en tijd, verder buiten beschouwing blijven.

Academische opleidingen

Het vak reactorkunde staat nu vijfentwintig jaar op het collegerooster van de afdeling der technische natuurkunde van de TH Delft. De opleidingsmogelijkheden werden in 1963 verder versterkt door het tot stand komen van een gewoon lectoraat naast het bestaande extraordinariaat waarin ir. H.R. Kleijn werd benoemd. Globaal gezien zijn twee aspecten in de reactorkunde te onderscheiden. Ten eerste het aspect waarbij het gedrag van de reactorkern en de neutronenhuishouding wordt geanalyseerd en de afscherming wordt geëvalueerd, beide gebruikmakend van veelal bekende kernfysische parameters, nucleaire meetmethoden en geavanceerde rekentechnieken (2). Daarnaast het gedeelte waarin het gedrag van de reactorkern wordt bestudeerd in relatie tot fysische verschijnselen die tijdens het reactorbedrijf optreden, zoals stromings- en ruisverschijnselen, warmte-overdrachtsproblemen e.d., voor het goede begrip waarvan een gedegen kennis van de klassieke natuurkunde nodig is. Tussen het begrijpen van de fysica van neutronen en het oplossen van de constructieve problemen van een kernreactor ligt een gebied waarin een geleidelijke overgang plaatsvindt van zuiver-fysische, via fysisch-technologische naar chemische en materiaal- en werktuigbouwkundige problemen.
Het belang van deze laatste aspecten werd door de Technische Hogeschool Delft vroegtijdig onderkend, getuige het feit dat de afdeling der scheikundige technologie in 1957 de leerstoel 'Scheikundige aspecten van de kernreactor' instelde en de afdeling der werktuigbouwkunde in 1961 de leerstoel 'Constructie van kernreactoren'. Voorts wordt in de tussenafdeling der metaalkunde sedert 1959 het college reactormaterialen gedoceerd. Onderwerpen die in het college kernreactortechnologie voor chemici (d 17)* aan de orde komen zijn o.a. materialen, corrosie, splijtstofontwikkeling en opwerking, en verschillende milieuaspecten. In het college kernreactoren voor studenten in de werktuigbouwkunde (i 25) worden kenmerken van verschillende typen energiereactoren, constructie van componenten, drukvaten, warmtewisselaars en pompen e.d. behandeld. In het college materialen voor de bouw van kernreactoren voor studenten in de metaalkunde en werktuigbouwkunde (mt 20) worden de kernfysische overwegingen besproken die de materiaalkeuze bepalen, alsmede de eisen die aan de onderdelen moeten worden gesteld. Fysische eigenschappen van de vaste stof en de roosterfouten onder invloed van straling worden voorts behandeld. Een belangrijke aanvulling op de hiervoor genoemde

* De voor de colleges gebruikte codering is ontleend aan de studiegids van de TH Delft.

colleges zijn de praktische oefeningen. De mogelijkheden daartoe werden in aanzienlijke mate verruimd toen in 1963 de Hoger Onderwijs Reactor in het nieuw opgerichte Reactor Instituut Delft in gebruik genomen werd (zie *(Inter)universitaire kernreactoren*). Dank zij dit instituut is het cursorisch onderwijs in de stralingsdosismetrie en stralingshygiëne (3) tot stand gekomen, waaraan gedurende de afgelopen zeventien jaar door een groot aantal academici, studenten en technici van verschillende disciplines is deelgenomen. Het aantal geslaagden voor het landelijk examen van de in het Interuniversitair Reactor Instituut (IRI) gegeven zogenaamde c-cursus bedraagt 375.
Het aantal studenten dat in de afgelopen vijfentwintig jaar als natuurkundig ingenieur in Delft afstudeerde op een onderwerp uit de reactorkunde is 57, terwijl er 11 promoties in dit vakgebied plaatsvonden. De totale onderwijsinspanning kan bij benadering afgeleid worden uit het totaal aantal studenten dat met goed gevolg heeft deelgenomen aan de verschillende colleges die vermeld zijn in tabel I, tezamen met de namen van de desbetreffende docenten.

Tabel I. Overzicht van colleges in het kader van de kernreactortechnologie

Vakgebied	Docent	Aantal	Opm.
Reactorkunde (c27 en 28)	dr. J.J. Went		tot 1974
Afscherming van stralingsbronnen (c39)	dr. ir. H.R. Kleijn	410	tot 1971
	dr. ir. H. van Dam		vanaf 1971
Kernreactortechnologie (d16)	ir. J.P.W. Houtman	± 100	vanaf 1959
Kernreactoren (i 25a en b)	ir. D.G.H. Latzko	± 600	vanaf 1961
Materialen voor de bouw van kernreactoren (mt 19)	ir. P. Jongenburger	100	vanaf 1959
Stralingsdosismetrie en stralingshygiëne (c80)	dr. J. Weber	96	vanaf 1970*

* Vanaf dit jaar zijn examens in dit vakgebied afgenomen.

Universitaire opleidingsmogelijkheden in de kernreactortechnologie zijn buiten Delft slechts aanwezig aan de Rijksuniversiteiten van Leiden en Utrecht. Sedert 1960 is dr. J.A. Goedkoop, wetenschappelijk directeur van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) als bijzonder hoogleraar verbonden aan de Rijksuniversiteit Leiden. Zijn bijdrage aan het onderwijs betreft colleges in de reactorfysica en de fysische aspecten van kernenergie, met in aansluiting daarop een tweedaags practicum bij het ECN in Petten, waaraan tot nu toe door in totaal 133 studenten werd deelgenomen. In het kader van speciale voordrachtencycli van de universiteit heeft hij hetzelfde onderwerp behandeld voor ongeveer 60 toehoorders. Aan de Rijksuniversiteit Utrecht vervult ir. P. Mostert, afdelingshoofd van de KEMA, sedert 1979 een bijzonder hoogleraarschap in de elektriciteitsvoorziening. In dit kader verzorgt hij colleges in de energiefysica, waarin een hoofdstuk is gewijd aan kernreactoren, en in de reactorkunde. Aan deze colleges werd tot nu toe door 50, respectievelijk 12 studenten deelgenomen.
Gedurende korte of langere tijd zijn in het verleden leerstoelen die met het onderwijs in de kernreactortechnologie samenhangen bezet geweest door ir. J. Pelser aan de Rijksuniversiteit Groningen, dr. J.M.W. Milatz aan de Rijksuniversiteit Utrecht en dr. M. Bogaardt aan de Technische Hogeschool Eindhoven.

(Inter)universitaire kernreactoren

In 1956 bracht een commissie uit de Delftse senaat onder voorzitterschap van prof. ir. H. Kramers, die eerder was belast geweest met het adviseren inzake 'het onderwijs en het onderzoek over kernreactoren aan de hogeschool' op verzoek van het

College van Curatoren advies uit over o.a. de vraag of het 'gewenst zal zijn dat onze hogeschool voor haar werkzaamheden op het onderhavige gebied de beschikking zal krijgen over een kernreactor' alsmede over de vraag hoe 'het werken hiermede zou dienen te worden gerealiseerd'. In dit advies werd geconcludeerd dat het wenselijk was dat de TH Delft over een experimentele kernreactor zou beschikken voor onderwijs in de reactorkunde èn met het doel de straling voor fysisch, chemisch en technologisch onderzoek te gebruiken. Nadat de Minister van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen, de heer mr. J.M.L.Th. Cals, had besloten de Hoger Onderwijs Reactor bij de TH Delft onder te brengen werd aan dezelfde commissie verzocht advies uit te brengen over een aantal in verband hiermee te treffen voorzieningen. In een in 1957 verschenen rapport kwam de commissie tot het oordeel dat het Reactor Instituut (RI), nu eenmaal 'tot plaatsing bij een instelling voor Hoger Onderwijs is besloten', moet worden beschouwd als een instituut, waarover de Technische Hogeschool het beheer voert voor de minister. Als zodanig zou het niet behoren tot één van de afdelingen van de TH en zou de begroting van het RI van die van de TH gescheiden gehouden dienen te worden. Het uitgangspunt van de minister was o.a. dat alle universitaire instellingen in Nederland met studierichtingen in natuurwetenschap of techniek van het RI gebruik zouden kunnen maken. Daarmee werd het nieuwe instituut, annex aan de kernreactor, in feite de status van interuniversitair instituut toebedeeld; in 1969 kreeg het IRI in Delft officieel deze status.

Dankzij de aanwezigheid van dit instituut hebben studenten die de colleges in de kernreactortechnologie en kernchemie in Delft volgen op een gemakkelijke wijze toegang gekregen tot een aantal voor de beoefening van genoemde vakgebieden noodzakelijke experimenteeropstellingen. Gedurende de afgelopen zeventien jaar hebben 244 studenten het practicum reactorfysische metingen gevolgd; meer dan 1.300 studenten volgden in die periode de praktische oefeningen nucleaire meet-en analysemethoden (4). Een aantal hunner kwam van andere universitaire instellingen. Studenten konden voorts praktische ervaring opdoen door tijdelijk gedetacheerd te worden bij het RCN en de KEMA, en later ook bij de kerncentrale Dodewaard. Andere practicumactiviteiten in het kader van het universitaire onderwijs zullen hier onbesproken blijven.

In de periode tussen 1966 en 1973 heeft de TH Eindhoven nog de beschikking gehad over een 10 kW kernreactor voor opleiding en onderzoek, Athene genaamd. De bijdrage hiervan tot het onderwijs in de kernreactortechnologie is uiterst bescheiden geweest, en het besluit tot sluiting ervan in 1973 is mede op grond daarvan genomen. Onderdelen van de Athene zijn vervolgens door het IRI overgenomen, waar geprobeerd is om een kritisch ensemble voor onderwijs en onderzoek, Delphi genaamd, op te zetten (5). Gebrek aan mankracht en middelen zijn er de oorzaak van dat het project uiteindelijk niet van de grond is gekomen.

De niet-universitaire lage-fluxreactor (LFR) bij het ECN in Petten, een 10 kW grafiet-gemodereerde kernreactor, wordt vanaf 1960 intensief gebruikt bij verschillende typen opleidingscursussen voor middelbaar en hoger technisch kader (zie volgende paragraaf) en incidenteel voor studenten, met name uit Leiden.

Opleidingen middelbaar en hoger technisch kader

Opleidingen voor middelbaar en hoger technisch personeel worden veelal gegeven in de vorm van cursussen, en deze worden op het gebied van de kernreactortechnologie bijna uitsluitend door het ECN in Petten verzorgd. Cursussen worden gegeven in de reactorkunde voor operators van onderzoek- en vermogensreactoren, in samenwerking met de KEMA over kernenergie voor docenten verbonden aan instellingen voor hoger beroepsonderwijs, en in de kerntechniek voor ingenieurs en HTS-ers.

Voor een overzicht van de RCN-activiteiten op dit gebied tot 1970 wordt verwezen naar een rapport (6). De in de afgelopen tien jaar gegeven cursussen in de kernreactortechnologie zijn samengevat in tabel II.

Tabel II. Overzicht van de ECN-cursussen in de kernreactortechnologie.

Reactor-operators	Basiscursus *reactorkunde* (±4 weken)	*kernenergie** (2-3 dagen)	
HFR, LFR	20 vanaf 1971	HBO-leraren 186	vanaf 1975
Dodewaard	± 30	*kerntechniek* (2 weken)	
Borssele	47 1971, 1976, 1980	Ingenieurs 142	1971-1980
Doel	61 1978, 1980, 1981	en HTS-ers	
IRI	2 1980	*vervolgcursus* (3 dagen)	
		Ingenieurs	
		en HTS-ers 94	1971-1980.

* CBO-conferentie (CBO = Contactcentrum Bedrijfscentrum Onderwijs)

Het jaarprogramma van deze ECN-cursussen wordt opgesteld aan de hand van behoeftepeilingen buiten het energiecentrum en de beschikbaarheid van geschikte docenten. Ieder jaar wordt door het ECN dan ook een overzicht van cursussen uitgegeven (7). De gedoceerde stof wordt aangevuld met kernfysische en reactorfysische experimenten bij de LFR; in het bijzonder voor reactoroperators geldt dat zij ervaring kunnen opdoen in het opstarten en bedrijven van de LFR. Voor hen is tevens een opleiding in eigen bedrijf georganiseerd en is de mogelijkheid geschapen ervaringen op te doen met een *full-scale* simulator, waarvan zich exemplaren bevinden in o.a. Essen (West-Duitsland) en in Bugey (Frankrijk).
Het IRI heeft een eigen opleiding vòor reactoroperators. Deze praktijkopleiding duurt twee jaar; tot nu toe hebben ongeveer 20 operators hun opleiding voltooid.
De onderwijsinspanningen op het gebied van de reactorkunde bij diverse opleidingen voor HTS-ers en voor leraren is moeilijk te specificeren en te kwantificeren. Het vermoeden bestaat dat dit in zeer sterke mate afhankelijk is van de belangstelling van de desbetreffende docent voor deze materie. Een maatstaf zou kunnen zijn de behoefte die er bestaat aan een inleidend boek in de kernreactorkunde (8). Incidenteel wordt onderwijs in de reactorkunde gegeven aan het Koninklijk Instituut voor de Marine. De afdeling voor kerntechniek van het Koninklijk Instituut voor Ingenieurs organiseerde in de periode 1957/1971 een drietal leergangen 'Technologie en constructie van kernreactoren'.

Terugblik en perspectieven

Uit een terugblik over de afgelopen vijfentwintig jaar blijkt dat het academisch onderwijs in de kernreactortechnologie in Nederland zich vooral heeft geconcentreerd aan de TH Delft en het IRI, terwijl de opleiding van het middelbaar en hoger technisch kader in de eerste plaats heeft plaatsgevonden bij het ECN in Petten. De aanwezigheid ter plaatse van kernreactoren voor opleiding en onderzoek is daaraan niet vreemd. Pogingen om elders experimentele faciliteiten bestemd voor onderwijs en onderzoek op te bouwen en in stand te houden, zijn uiteindelijk niet gelukt. Het is in dit verband interessant om te verwijzen naar het in 1970 aan de regering uitgebrachte advies van de Wetenschappelijke Raad voor Kernenergie (9).
Gedurende de laatste jaren valt een duidelijke teruggang te constateren in het aantal studenten dat zich in de kernreactortechnologie wenst te bekwamen, een verschijnsel dat ook in andere landen wordt waargenomen. Dit hangt samen zowel

met de acties die tegen de kernenergie gevoerd worden, alsmede met de huidige vermindering van de werkgelegenheid in de nucleaire industrie. Het gevaar bestaat dan ook dat adequate vervanging van het vergrijzend personeel dat op één of andere manier werkzaam is op het gebied van de kernreactortechnologie en dat in technisch, wetenschappelijk en/of zakelijk opzicht goed is onderlegd, in de toekomst moeilijk zal kunnen worden. Het is echter te hopen dat de jongere generatie geïnteresseerd zal blijven om het vakgebied te bestuderen en vooral nieuwe ontwikkelingen te volgen en te stimuleren, opdat Nederland in dit opzicht niet een achtergebleven gebied gaat worden.

Referenties

(1) J.A. Goedkoop, De Nederlands-Noorse Reactorschool, *Energiespectrum 81*, (1981) blz. 74-78.

(2) H. van Dam, *Collegedictaat Reactorkunde c27*, TH Delft, 1980.

(3) J. Weber, C.E. Rasmussen en A.H.L. Aalbers, *Stralingsbescherming*, Inleiding tot de Stralingshygiëne, 3e druk, Delftse Uitgevers Mij, Delft 1979.

(4) IRI Gids voor het studiejaar (1980-1981), Delft 1980.

(5) H. van Dam en anderen, *Delphi, een kritisch ensemble voor onderwijs en onderzoek*, IRI-130/131-76-01, 1976.

(6) K.L.A. Weimar, *Tien jaar opleiding in Petten*, RCN-70-069, 1970.

(7) J. Montizaan, *ECN-cursussen Energietechniek en haar toepassingen*, overzicht 1980-81, ECN 1980.

(8) L.M. Caspers en D.J. v.d. Hoek, *Kernreactorkunde;* een beknopte inleiding, 4e druk, Delftse Uitgevers Mij, Delft 1979.

(9) *Samenwerking op het gebied van de reactorfysica en het efficiënte gebruik van de in Nederland beschikbare onderzoekreactoren*, advies R112 van de Wetenschappelijke Raad voor Kernenergie, Den Haag, 23-7-1970.

26. ENERGIE-ANALYSE VAN DE TOTALE KERNENERGIE-CYCLUS VOOR LICHTWATERREACTOREN

J. Kistemaker

Dit is het eerste van drie hoofdstukken die ingaan op de vraag naar het nut of de economische noodzaak van kernenergie. Achtereenvolgens bespreken ze de opbrengst of het rendement in termen van energie, geld en de samenleving als geheel. Elk van deze gezichtspunten heeft zijn eigen norm. De norm die hier aan de orde komt is of, en zo ja, hoeveel winst kan worden behaald in de energiehuishouding met het toepassen van kernenergie. Daarbij moeten de kosten van arbeid, grondstoffen, materialen en installaties, die nodig zijn om de hele splijtstofkringloop op gang te houden, worden omgerekend in energie. Tevens moet het verschil tussen laagwaardige energie, zoals warmte, en hoogwaardige energie, zoals elektriciteit, in rekening worden gebracht. Een en ander is niet eenvoudig, zoals in detail wordt uiteengezet. Een dergelijke systematische benadering, ook toegepast op andere energiesystemen, brengt aan het licht dat kernenergie buitengewoon voordelig is.

Inleiding

Hoe lang kunnen wij doorgaan met het aanboren van nieuwe energiebronnen? Zijn deze energiebronnen duur of goedkoop, en wat betekent 'duur' voor onze samenleving? Dekt het begrip duur, uitgedrukt in bijvoorbeeld dollars, de behoeftewaardering in onze geïndustrialiseerde wereld? En is deze behoeftewaardering dezelfde als in de Derde Wereld? Hoe wordt onze behoeftewaardering eigenlijk genormeerd? Door het ogenblik? Door hen die toevallig in de twintigste eeuw de militaire, politieke of economische macht in handen hebben? Zou het niet reëler zijn uit een oogpunt van mondiale politiek op lange termijn (bijvoorbeeld honderd jaar) om onze waardering voor een kilowattuur niet uit te drukken in dollars of guldens, maar in een maat voor de inspanning die er nodig is om een kilowattuur elektriciteit op te wekken?

Wij weten dat voor het in stand houden van onze energiecycli nodig zijn:

a) arbeiders, met hoge of lage salarissen;

b) grondstoffen, zoals ijzer, koper, cement en zand, enz.;

c) brandstof, zoals kolen, gas, olie of uranium;

d) kilowatturen, respectievelijk calorieën in de vorm van brandstoffen of elektriciteit voor het doen varen van onze tankers, het maken van kernenergiecentrales, of het delven, transporteren en malen van kolen.

Men zou moeten beseffen dat de prijs van een ton kolen, of van een kilowattuur geleverd aan de klemmen van welk type elektrische centrale dan ook, wordt bepaald door

1 het aantal uren arbeid;

2 het aantal geïnvesteerde kilowatturen;

3 de levensstandaard en dus het loonniveau voor de geleverde arbeid;

4 de grondstoffenmarkt;
5 de vraag naar energie op de plaats waar deze geleverd wordt;
6 de afstand waarover de brandstof getransporteerd moet worden;
7 overheidsmaatregelen.

De verkoopprijs van een kilowattuur (kWh) elektriciteit, uit een elektrische centrale, wordt binnen zekere grenzen bepaald door deze zeven factoren en is derhalve niet overal op aarde dezelfde. Regelmatig komt het voor dat op de ene plaats de prijs tweemaal zo hoog is als op de andere. Deze verschillen ontstaan min of meer onafhankelijk van de voorraden brandstof die de natuur te bieden heeft.

Het probleem van de brandstofvoorraden is reeds eeuwen oud. De makkelijkst toegankelijke voorraden raken het eerst op en dan rijzen allerlei vragen. Zoals: loont het nog wel om de olie uit de teerzanden te halen? Hoe laag kan de concentratie uranium in rotsen zijn, voordat de energiekosten van de winning hoger worden dan de energie-opbrengst van de gewonnen splijtstof bij gebruik in een elektriciteitscentrale? Dat leidt tot de vraag: hoeveel kilowattuur moet men aan de brandstofcyclus, inclusief afschrijving en bedrijf van de elektriciteitscentrale zelf, toevoeren voor de produktie van één kilowattuur elektriciteit? Daarbij moet men de afschrijving van de geïnvesteerde energie in de installaties en gebouwen van de totale cyclus, inclusief de centrale, in rekening brengen, evenals de energieconsumptie binnen de cyclus zelf.

Het ligt voor de hand te denken dat wanneer bijvoorbeeld het antwoord zou zijn: 3 kWh toevoeren om 1 kWh te produceren, men direct moet stoppen met zo'n energie-'vernietigings'-proces. Dit geldt echter voor elke elektriciteitscentrale, gestookt met kolen, gas, zowel als kernenergie. Zo simpel is het daarom niet.

Een kilowattuur elektrische energie is hoogwaardig, dat wil zeggen: kan via een elektromotor of een elektrochemisch proces, of gewoon via een gloeilamp, tot een zeer hoog percentage en absoluut schoon in andere door de mens gewenste energievormen worden omgezet. Elektriciteit is onlosmakelijk verbonden met de geïndustrialiseerde westerse samenleving.

Een kilowattuur thermische energie is laagwaardig. Het zit in elk kolenvuur of in een gas- of olievlam. Om er een trein mee voort te bewegen zijn via een stoomlocomotief wel tienmaal zoveel thermische kilowatturen nodig als elektrische.

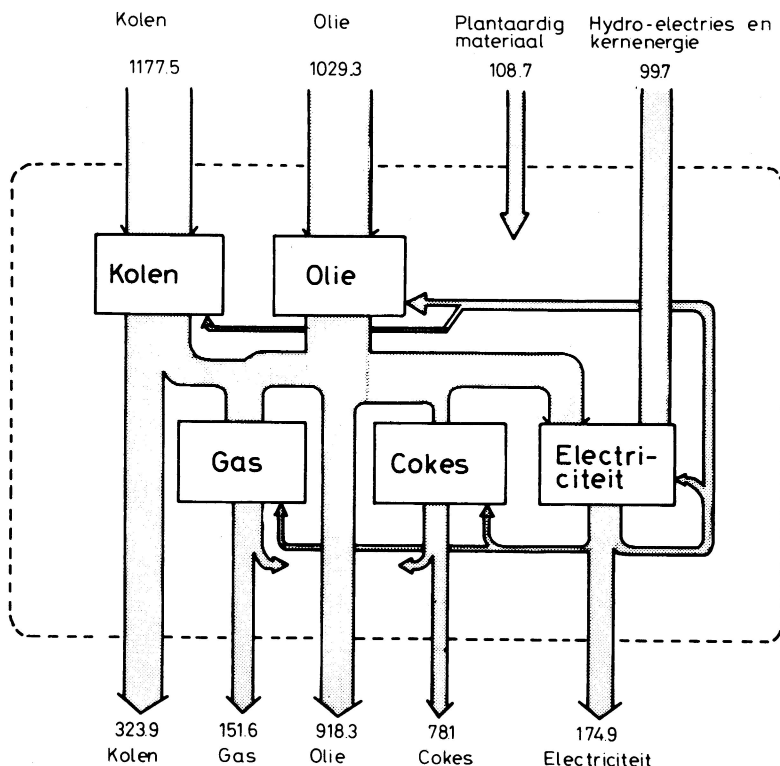
We zullen dit nog iets meer verduidelijken. Fossiele brandstoffen vertegenwoordigen een zekere hoeveelheid primaire en potentiële energie ten opzichte van hun aardse omgeving. Deze kan in kinetische energie van moleculen worden omgezet als de brandstof zich met zuurstof verbindt. Zuurstof moet zich verbinden met koolstof om kooldioxyde te vormen. Pas dan is de potentiële energie minimaal geworden. De mensheid heeft sinds de uitvinding van het vuur gebruik gemaakt van in de natuur aanwezige verstoringen van de energetisch meest waarschijnlijke toestand. Deze verstoringen vinden hun oorsprong in levensprocessen. Immers steenkool is uit plantaardig leven ontstaan, evenals waarschijnlijk het Groningse aardgas (methaan). Biologisch leven heeft mogelijk iets met olie te maken.

Waterkracht en kernenergie vertegenwoordigen óók primaire potentiële energie, maar meer van puur kosmische aard. Zij hebben met levensprocessen niets te maken. Waterkrachtcentrales profiteren van de zonnewarmte die het water uit de zeeën verdampt en op de bergen doet neerdalen. De zogenaamde kernenergie komt vrij als zware atomen, zoals uranium-235 of plutonium-239, door een neutron tot splitsing worden gebracht. In dit laatste geval vliegen de splijtingsprodukten met enorme kinetische energie weg. Deze kinetische energie wordt op zijn beurt geheel in warmtebeweging van moleculen omgezet.

Interessant is dat behalve deze thermische warmte in de 'kachel' al sinds de eerste landbouwnederzettingen van de mens een andere vorm van energie is gebruikt, namelijk de *stralingswarmte* van de zon, of van een vuur. Daar kwam anderhalve eeuw geleden als derde vorm bij de elektrische energie. Als we over deze energie-

vormen spreken denken we allereerst aan het meest karakteristieke, de gemakkelijke transporteerbaarheid. Elektriciteit transporteert men langs een koperdraad. Warmtestraling heeft zelfs helemaal 'niets' nodig: zij straalt door de lege ruimte. Warmtestraling kan door lucht zowel als door vacuüm worden getransporteerd.
Het transport van elektrische energie berust niet op kinetische energie van moleculen, maar op gerichte stroming van ionen en/of elektronen onder invloed van een spanningsverschil. Het werd pas belangrijk toen Gramme in de periode tussen 1860 en 1865 ontdekte dat door middel van met stoommachines aangedreven dynamo's (d.w.z. bewegende koperdraden in een magneetveld) grote hoeveelheden secundaire elektrische energie ter beschikking kwamen. Elektrische energie is die vorm van energie die als tweede stap (dus secundair) vrijkomt, nadat men allereerst warmte-energie onder de stoomketel heeft vrijgemaakt. Het is een veredelde vorm van energie. De omzetting van primaire warmte-energie in secundaire elektrische energie gaat natuurlijk met verliezen gepaard. Deze zijn tot nu toe zeer groot, namelijk 65 à 75%.
Met de stralingswarmte is het bijzonder gesteld. Deze hogere energievorm komt alleen vrij ten gevolge van *een veranderende beweging*, een versnelling van elektrisch geladen deeltjes, en is daarom een energievorm die nog hoger op de 'kwaliteitsladder' staat dan elektrische energie. Het is tertiaire energie. Het rendement ten opzichte van de oorspronkelijke warmtebron (fossiele- of kernenergie) is daarom nog lager. Tot deze klasse behoort de zogenaamde *laserstraal*, als eerste grootscheepse poging om langs technologische weg stralingsenergie op beheerste wijze te benutten. Het rendement van de beste kooldioxyde-lasers bedraagt ongeveer 10% à 20% van de aangewende elektrische energie. Dit betekent dat het rendement ten opzichte van de oorspronkelijke fossiele energiebron minder dan 5% is.
Elektrische en stralingsenergie zijn typische aspecten van de menselijke ontwikkeling en samenleving die nà 1600 zijn ontstaan en zijn als zodanig uniek op aarde. Het zou onjuist zijn te zeggen dat deze beide energievormen verkwistingen zijn. Zij vormen hoogst belangrijke produkten van het cultuurpatroon dat de laatste vier eeuwen is opgebouwd en waarbij de mens in vele opzichten de beheerser van de natuur is geworden. Als men nu diverse energie-omzettingscycli wil vergelijken, *in casu* de kernenergiecyclus met de 'klassieke' kolen-, olie- of gascycli, dan dient men zich bewust te zijn van de verschillende kwaliteit van de kilowatturen.
Sommige auteurs hebben de laatste jaren in twijfel getrokken of kernenergiecentrales, mondiaal gezien, energetisch verantwoord waren (1, 2). Om hierin inzicht te krijgen dient men een onderzoek te doen naar alle schakels van de kernenergiecyclus.
Bij de beoordeling van de uitkomsten van dit soort evaluaties kan men verschillende maatstaven aanleggen.
De bedrijfseconomische, die de kostprijzen vergelijkt van de geproduceerde kilowatturen elektriciteit. Dit is van belang voor de klant (nationaal).
De absolute energiebalans, die aangeeft hoeveel kilowatturen thermische energie nodig zijn in de totale cyclus voor de produktie van een kilowattuur elektriciteit. Dit is van belang uit een oogpunt van het milieu (nationaal).
De besparing aan fossiele brandstof bij gebruik van kernenergie. Ook dan moet men bij voorkeur uitgaan van de totale kernenergiecyclus en zich niet op eng nationalistisch standpunt stellen. Dit is van belang uit economisch-politiek oogpunt (internationaal).
Een vergelijking tussen fossiele cycli en kernenergiecycli hebben wij niet speciaal uitgevoerd. De uitkomst ligt tamelijk voor de hand, daar deze cycli in hoofdzaak worden beheerst door het rendement van de centrales. En daarvan kan men zeggen dat dit voor de ene cyclus niet tienmaal zo hoog is als voor de andere, of omgekeerd. De kernenergiecentrale is momenteel energetisch iets minder efficiënt, althans wanneer gebruik wordt gemaakt van een lichtwaterreactor (LWR). Deze

veroorzaakt een iets grotere thermische vervuiling van het milieu dan een fossiel gestookte centrale.
Een interessant aspect hebben Chapman, Leach en Slesser bekeken (1). Zij onderzochten het energierendement van de totale Engelse ruwe-energiehuishouding aan de hand van *input-output*-beschouwingen. Daartoe vergeleken zij de calorische waarde van de grondstoffentoevoer met de calorische waarde van de produkten die aan de klant geleverd worden, zoals gas, olie, cokes, benzine en kilowatturen elektriciteit (zie figuur 1). Zij vonden dat de energie-industrie de grootste energiecon-



Figuur 1
***Input-output*-beschouwing van de Engelse energie-industrie in 1970. De bruto energie-inhoud van de toegevoerde grondstof is ca. 2.400 eenheden, terwijl de netto *output* van de produkten een calorische waarde vertegenwoordigt van ca. 1.600 eenheden.**

sument is. Uit figuur 1 blijkt dat 30% van de primair in de ruwe grondstoffen aanwezige calorieën verloren gaat bij de bereiding van door de mens gewenste kwaliteitsprodukten. De kolen-, cokes-, gas- en olie-industrie heeft een rendement van 70 tot 80%, de elektriciteitsindustrie van slechts 30%. Als men er de laser-fotonen-industrie aan had toegevoegd zou men minder dan 5% hebben moeten invullen.
Waar het evenwel op aankomt is dat de beoordeling van al deze energievormen niet alleen op basis van rendementen mag gebeuren, maar men ook terdege rekening dient te houden met de *aard* van het produkt. Waar kan men het produkt voor gebruiken? Met een liter ruwe olie kan men geen elektrisch scheerapparaat aandrijven. Daarvoor heeft men elektrisch vermogen nodig.
Als men een energie-analyse van verschillende energiecycli wil uitvoeren dient men waar mogelijk onderscheid te maken tussen kilowatturen thermische energie en kilowatturen elektrische energie. Zij zijn verschillend. Dat is echter geen simpele zaak. Voor de vervaardiging van betonnen, stalen, koperen, en aluminium voorwerpen worden beide soorten kilowatturen gebruikt. Dikwijls is het daarom nodig

zich tevreden te stellen met gemajoreerde schattingen die tot op 25% nauwkeurig geacht kunnen worden en tot inzicht voeren in de 'energie-economie'. Waar het ons allereerst om gaat is een antwoord te krijgen op de vraag: *bespaart men olie door toepassing van kernenergie en zo ja, hoeveel?*

Dit is een levensvraag voor de Westeuropese economie, die anno 1981 voor 70% van zijn energiebehoefte afhankelijk was van olie-import uit Noord-Afrika en het Midden-Oosten. Daarbij dient men niet alleen naar de elektriciteitscentrale te kijken, maar ook naar de energieconsumptie in de gehele splijtstofcyclus.

Over de methode van energie-evaluatie

Wij zullen trachten elke schakel uit de kernenergiecyclus afzonderlijk te analyseren op

a) energie-inhoud van de installaties; hieruit kan een jaarlijkse energie-afschrijving per elektriciteitscentrale worden afgeleid;

b) energiegebruik per jaar en per elektriciteitscentrale.

Om tot een concreet uitgangspunt te komen is alles betrokken op het in stand en in werking houden van een lichtwaterreactor-elektriciteitscentrale (LWR) met een vermogen van 1.000 MW(e), waarin 3.000 MW thermische energie wordt opgewekt. Wij zullen ons daarbij baseren op officiële gegevens (zie onze analyse van 1975 (3)).

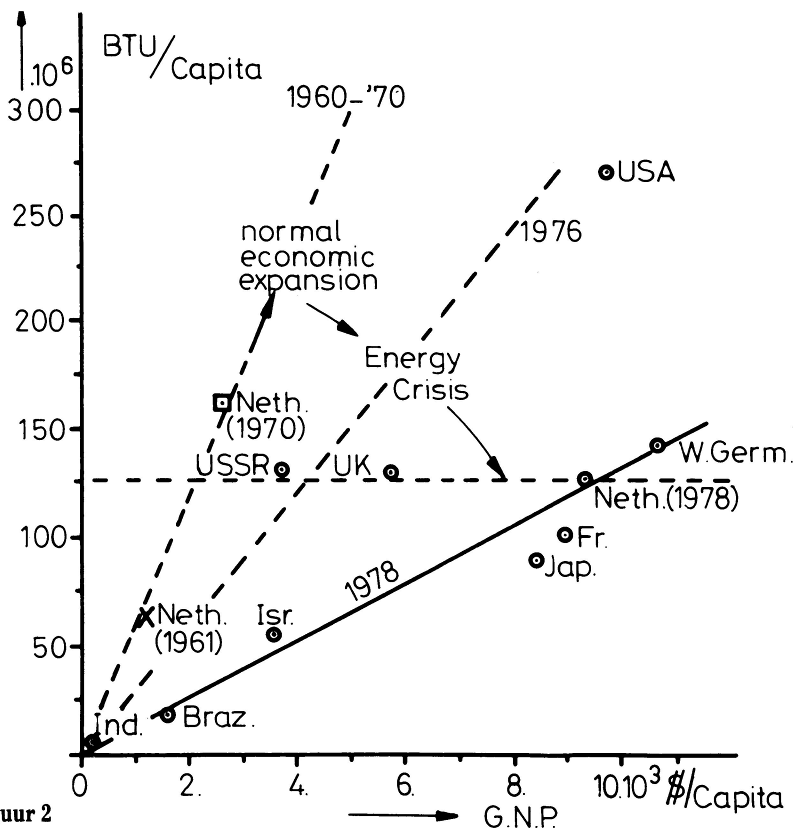
Wij hebben getracht analyses in detail uit te voeren, maar het aantal gegevens is beperkt. Als bijvoorbeeld de bouw van een reactorgebouw plus turbine-installaties een miljard dollar gekost heeft is slechts de helft van dit bedrag van direct belang voor de energie-analyse. De andere helft bestaat uit renteverliezen gedurende de bouw, winst, belastingen, indirecte kosten, kosten van *engineering* en dergelijke, welke posten niet specifiek zijn voor kernenergie. Voor elke vorm van elektriciteitsproduktie heeft men deze zelfde indirecte kosten. Zij zorgen dat de bevolking in al zijn vertakkingen kan leven, werken en zich amuseren, of men nu een kerncentrale of een kolencentrale bouwt. Niettemin nemen wij hier het gehele bedrag.

Een reactor plus centrale hebben wij in vijfentwintig jaar afgeschreven. Alle andere schakels, zoals de opwerkingsfabrieken, de verrijkingsfabrieken, de brandstofelementenfabrieken, alle in tien of vijftien jaar. Deze tijden zijn korter dan die welke in de klassieke energie-industrie worden toegepast en waardoor de energie-afschrijving bij ons te ongunstig is voorgesteld.

Bij de beoordeling van detailposten zoals turbo-generatoren en koeltorens kent men de totale kapitaalsinvestering. Daarnaast weten wij soms ook welke de hoofdbestanddelen zijn in tonnen ijzer, koper, of beton. Met behulp van tabel I kent

Tabel I. Warmte-energie nodig voor de bereiding van basismaterialen.

1 kg bewerkt staal vergt		8 à 13 kWh	thermisch
1 kg aluminium vergt		80 à 100 kWh	thermisch, waarvan voor het elektrolytisch proces
		15 kWh	elektrisch
1 kg koper vergt		50 kWh	thermisch
1 kg glas vergt		8 kWh	thermisch
1 kg beton op basis van:	1 deel cement, 2 delen zand en 3 delen grint vergt minder dan	1 kWh	thermisch
1 kg plastics vergt		25 à 40 kWh	thermisch
1 kg zirkonium vergt		150 kWh	thermisch
1 kg UF_6 vergt ca.		330 kWh	thermisch, inclusief ertswinning en omzetting in UF_6



Figuur 2

Het energiegebruik per inwoner (BTU per capita)* uitgezet als functie van het bruto nationaal produkt per inwoner in tien landen. Hier gebruiken wij uitsluitend de lijn voor 1978. (Dit is een zogenaamd *Bullard-Herendeen plot.)*

*** 1 BTU = $2.93.10^{-4}$ kWh thermisch**

men dan de energie-inhoud. Soms weet men de geldswaarde van detailonderdelen en kan men door aftrekken fracties isoleren die onbenoembaar zijn. Het beste dat men daarmee kan doen is dit 'restant' te waarderen op energie-inhoud met behulp van de *bruto nationaal produkt-kilowattuur (thermisch)-regel* (1). Hiervoor hebben wij steeds genomen: 1 dollar bruto nationaal produkt (BNP) komt overeen met 4 kWh thermisch (zie figuur 2). Hierbij is de waarde van de dollar van 1978 aangehouden.

Deze *BNP-kWh*-regel geldt alleen voor grote, gemengde totaalproduktenpakketten. Nooit voor afzonderlijke produkten zoals een locomotief of een turbine. Het is een gemiddelde waarde, die bij detailberekeningen alleen op arbeidsintensieve restanten mag worden toegepast als men geen beter middel heeft.

De *BNP-kWh*-regel kan men ook gebruiken voor een globale schatting van een complex geheel als de totale kernenergiecyclus. Wij zullen dat ook doen.

Het bezwaarlijke hiervan is echter, dat

a) het inzicht in grote projecten belemmerd wordt;

b) de enorme nationale *overhead* die feitelijk in de vorm van interest, dividenden, belastingen en kosten van hulpdiensten ongeveer de helft van de totale bouwkosten uitmaakt, op dezelfde wijze aanwezig is bij de bouw van een niet-kernenergiecentrale;

c) de kernenergiecyclus hierdoor te duur wordt voorgesteld (kapitaalintensief).

Immers, een nieuwe technologie zoals de kernenergie-technologie vraagt in zijn beginstadium meer *overhead*-kosten en heeft meer toevallige tegenvallers dan een oude gevestigde technologie.

Berekening van de energie-inhoud van een 1.000 MW(e)-kernenergiecentrale (LWR-type)

Globale beschouwing

Aan een reactor valt weinig anders te beleven dan dat er veel beton en staal in verwerkt zijn. Alleen de eigenlijke reactorketel met zijn kern van splijtstofelementen is iets bijzonders.
Bij een globale evaluatie van de energie-inhoud kunnen wij uitgaan van de getallen die genoemd worden in deel 3 van de Nota Energiebeleid van het Ministerie van Economische Zaken uit 1980 (4). Daarin vinden wij dat een kernenergiecentrale met een elektrisch vermogen van 1.000 MW 1,85 miljard gulden kost. Telt men daarbij nog de rentelast die gedurende de bouw ontstaat, dan komt men op zo'n 2,4 miljard gulden. Wij herleiden dit bedrag op basis van het prijsniveau van 1978 tot ca. 2 miljard gulden, waarbij rekening is gehouden met de inflatie. Dit bedrag correspondeerde in 1978 met ongeveer 1 miljard Amerikaanse dollars. Op dit bedrag kunnen wij nu de *BNP-kWh*-regel toepassen, volgens welke 1 dollar BNP overeenkomt met 4 kWh thermische energie (zie blz.316).
Volgens deze regel bestaat de warmte-energie-inhoud van een kernenergiecentrale van 1.000 MW(e) dus uit *4 miljard kWh thermisch.* Zo'n centrale produceert per jaar 20 miljard kWh warmte. De hele investering wordt dus in ruim twee maanden reactorbedrijf terugverdiend. Daarna is de centrale nog minstens vijftien en waarschijnlijk wel vijfentwintig jaar in bedrijf.
Bij een dergelijke 1.000 MW(e)-centrale behoort een evenredig deel van de splijtstofcyclus in de wereld. Wij zullen zien dat de warmte-investering over alle installaties en gebouwen in minder dan één maand reactorbedrijf wordt terugverdiend, waardoor het equivalent van de totale energie-investering op ca. drie maanden komt, een kwart jaar. Bij vijfentwintig jaar bedrijf betekent dit een jaarlijkse energie-afschrijving van 1% van de door de centrale geleverde warmte-energie. Daar is de afschrijving van de verrijkingsfabriek, van de brandstofelementenfabriek en van de afval- en opwerkingsinstallaties bij inbegrepen.

Detailbeschouwing

Een kernenergiecentrale bestaat uit de volgende hoofdonderdelen.

Terrein met gebouwen, waarin begrepen alle toe- en afvoerbuizen, riolering, wegen, ventilatie, de volledige elektrische installatie, enzovoort. In de centrale te Borssele zijn 200.000 ton beton en 6.500 ton staal verwerkt. Volgens de getallen in tabel I correspondeert dit met 265 miljoen kWh thermisch. Een 1.000 MW elektrische centrale is tweemaal zo groot als die in Borssele. Wij nemen nu aan dat de bovengenoemde getallen ook verdubbelen, wat zonder twijfel te hoog is geschat. We komen derhalve voor deze post op een investering van *530 miljoen kWh thermisch.*

Reactorvat met toebehoren. Deze post omvat het eigenlijke stalen reactorvat, de splijtstofkern, plus de circulatiesystemen voor stoom en water en de automatische beveiliging. De eigenlijke kern bestaat uit 90 ton uraniumoxyde, verpakt in een metalen omhulsel van 27 ton zircalloy. Hiervoor zijn nodig:
1 400 ton erts (*yellow pie*). Op basis van een uraniumgehalte van 0,1% in de gesteenten, inclusief de chemische opwerking en het malen van het gesteente, is hiervoor ca. 500 miljoen kWh thermisch nodig.
2 220 ton scheidingsarbeid voor de ultracentrifuge-scheidingsfabriek in Almelo, waarvoor 50 miljoen kWh elektrisch, dat is 150 miljoen kWh thermisch, nodig is. (Het Franse diffusieproces gebruikt driemaal zoveel energie).
3 Voor het bewerken en verpakken in 27 ton zircalloy zijn nodig: 20 miljoen kWh thermisch.

4 Voor leidingen en pijpen in Borssele: 70 ton roestvrij staal en 1.200 ton koolstofstaal, wat volgens tabel I correspondeert met 16 miljoen kWh thermisch. Voor een tweemaal zo grote reactor wordt dit dus 32 miljoen kWh thermisch.
Opgeteld vraagt dit deel een investering van in totaal *700 miljoen kWh thermisch.*

Turbogeneratoren. Deze vormen de grootste kapitaalsinvestering in de hele centrale. Hiertoe behoren de twee eigenlijke turbogeneratoren (elk met een vermogen van 500 MW(e)), de condensors, de dynamo's en het hele pijpen- en kleppensysteem. Hiervoor zijn nodig: 6.600 ton ijzer en 700 ton koper. De energie-inhoud daarvan is *125 miljoen kWh thermisch.*

Koeltorens. Een paar grote koeltorens zijn nodig met de bijbehorende pompen en leidingen. Deze vereisen 45.000 ton beton en 1.300 ton ijzer, wat correspondeert met een warmte-energie-investering van *60 miljoen kWh thermisch.*

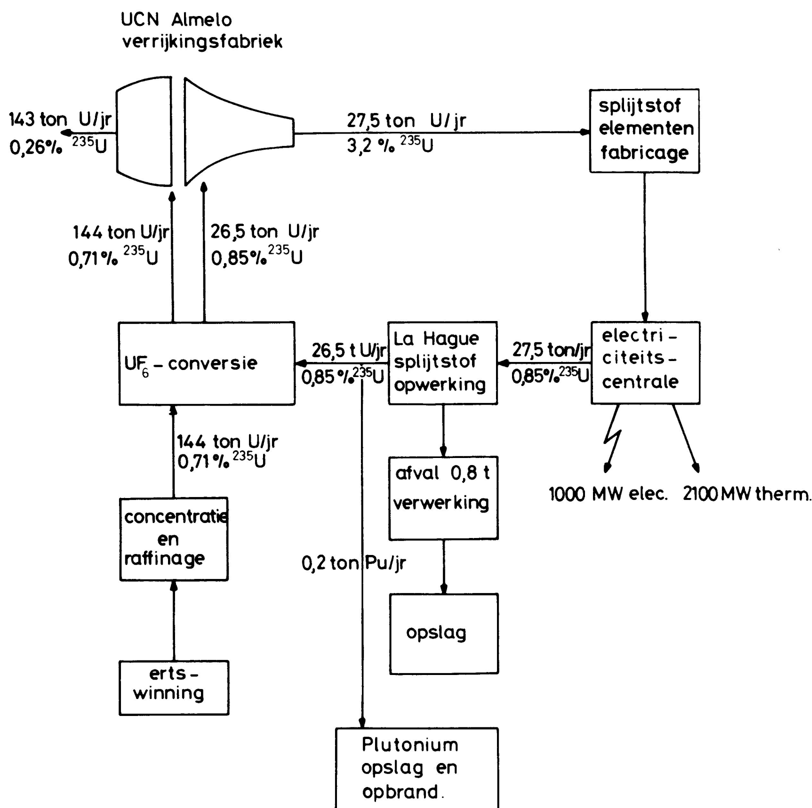
De detail-analyse van het totale complex van een 1.000 MW elektrische kernenergiecentrale laat zien dat *1.415 miljoen kWh thermisch* aan warmte-energie geïnvesteerd moet worden. Gebaseerd op de in de globale beschouwing genoemde bouwprijs van 2 miljard gulden anno 1978 en de *BNP-kWh*-regel vonden wij *4 miljard kWh thermisch.* Het verschil komt voort uit de menselijke activiteiten gedurende de bouw en fabricage van alle onderdelen die in een elektrische centrale verwerkt zijn. Allen die bij de bouw en fabricage betrokken zijn moeten leven, hebben gezinnen, moeten dagelijks vervoerd worden, enzovoort. Dat kost niet alleen veel extra geld, maar ook veel energie (benzine, gas).
Dat is wat de *BNP-kWh*-regel zichtbaar maakt. De detail-analyse komt uit op een energie-investering die driemaal lager is dan die welke met behulp van de *BNP-kWh*-regel werd berekend. Dit bevestigt de eenvoudige conclusie die al in de globale beschouwing werd getrokken: in ruim twee maanden bedrijf heeft een kernenergiecentrale de totale investering aan energie die voor de bouw nodig was terugverdiend. In soortgelijke analyses kwamen Chapman c.s. (1) in 1974 uit op een periode van ongeveer vijf maanden. Aangezien een kernenergiecentrale gewoonlijk vijfentwintig jaar meegaat, is dit geen schokkend verschil.
Door sommigen wordt de hier berekende 4 miljard kWh thermisch vergeleken met de door de centrale gelverde *elektriciteitsproduktie.* Deze laatste bedraagt ca. 6,6 miljard kWh(e) per jaar, bij een belasting van 75% en een omzettingsfactor van 0,32. De energie-investering zou dan wel 8 maanden reactorbedrijf vergen. Deze conclusie is echter onjuist. Elektrische en thermische kilowatturen zijn niet identiek.
Anderen stellen dat in de *BNP-kWh*-relatie 1 dollar correspondeert met 13 kWh (2). Dit is driemaal zoveel als de door ons berekende relatie voor het jaar 1978, wat veroorzaakt wordt door het in figuur 2 aangegeven verloop. De zo berekende energiebehoefte is dan veel te hoog.

Over de splijtstofcyclus

Tot de splijtstofcyclus behoren alle bewerkingen en fabricageprocessen die nodig zijn om een 1.000 MW(e)-centrale draaiende te houden. Men kan hiertoe rekenen:
- de mijnbouw en ertsverwerking
- de chemische omzetting in UF_6-gas
- de verrijkingsfabriek (in Almelo of elders)
- de omzetting van het verrijkte gas in vaste splijtstofelementen
- het opslaan en de afvoer van afgewerkte splijtstofelementen
- de chemische opwerkingsfabriek in La Hague
- de verwerking van het radioactieve afval

- het opbergen van het afval
- de opslag en verwerking van het plutonium.

De totale cyclus is zichtbaar gemaakt in figuur 3. Daarin kan men zien hoe per jaar



Figuur 3
Splijtstofkringloop voor een 1.000 MW(e) kernenergiecentrale van het lichtwaterreactor-type. Enkele aangenomen gegevens:
versplijting 31.000 MW-dagen per ton uranium
thermisch rendement 0,32
belastingsfactor 0,75

144 ton vers uranium nodig is om zo'n elektriciteitscentrale draaiende te houden. Hiervan verdwijnt direct 143 ton in het neutrale (niet radioactieve) afval van de verrijkingsfabriek, terwijl in La Hague na chemische opwerking 800 kg gedeeltelijk radioactieve splijtingsprodukten vrijkomen, plus 200 kg plutonium. Het volume van het afval is nog geen kwart kubieke meter per jaar. Per jaar moet ongeveer 40 ton afgewerkte splijtstofelementen van de elektriciteitscentrale per trailer naar La Hague vervoerd worden, wat betekent dat elke maand één transport zal plaatsvinden.

Het spreekt vanzelf dat van al de bovengenoemde delen van de splijtstofcyclus slechts die fracties genomen moeten worden die nodig zijn om een 1.000 MW(e) centrale in bedrijf te houden.

Een eerste oriëntatie voor de lezer moge zijn dat de produktieprijs van één kilowattuur elektriciteit, geleverd aan het net, voor éénderde deel uit kosten bestaat die samenhangen met toelevering en afvoer van splijtstof, dat wil zeggen: met het economische aspect van de splijtstofcyclus. Daarin zitten ook alle afschrijvingen van geïnvesteerde kapitalen. De afschrijving van de bouwkosten van de eigenlijke kernenergiecentrale bepaalt voor een belangrijk deel de uiteindelijke produktieprijs van

de elektriciteit, niet de toe- en afvoer van de splijtstof. Hieruit volgt al direct dat de evenredige energie-investering in de splijtstofcyclus geëvalueerd kan worden met behulp van de *BNP-kWh*-regel. De analyse die wij in 1975 hiervoor uitvoerden geldt nog in dezelfde mate.

Evenredige investering in:	
a) delven en ertswinning	50 miljoen kWh thermisch
b) verrijkingsfabriek UCN Almelo	360 miljoen kWh thermisch
c) vervaardiging splijtstofelementen	40 miljoen kWh thermisch
d) chemische opwerkingsfabriek La Hague	80 miljoen kWh thermisch
e) inrichting bovengrondse bergplaats voor radioactief afval in stalen tanks	10 miljoen kWh thermisch
	540 miljoen kWh thermisch

De posten sub a) en e) hebben wij geschat op basis van kostprijsgegevens.
Voor het opslaan en afvoeren van afgewerkte splijtstofelementen zijn o.a. stalen transporttanks nodig. Zo'n tank weegt 50 ton. Op basis van kostprijs en tabel I komt men zo tot een investering van ca. 1 miljoen kWh thermisch voor vervoer, wat te verwaarlozen is. In 1980 vonden reeds ongeveer 300 van deze transporten plaats door heel Europa heen, verzorgd door Nuclear Transport Ltd.
De evenredige energie-investering in de totale splijtstofcyclus bedraagt ruim 10% van de investering in de eigenlijke kernenergiecentrale.
De behandeling van de 200 kg plutonium die per jaar in La Hague vrijkomt is buiten beschouwing gelaten. In feite is dat materiaal de splijtstof voor snelle reactoren van het type Phénix (Frankrijk). Het kan daar op dezelfde economische wijze energie produceren als het uranium-235 in de lichtwaterreactoren doet. De hiermee samenhangende monetaire en energetische kosten moeten bij de economie van de Phénix worden gerekend en niet bij die van de lichtwaterreactor.

Over de energie-economie van de splijtstofcyclus van de lichtwaterreactor

Bij een beschouwing over de energie-economie zal men net als bij de meer vertrouwde geldeconomie moeten letten op inkomsten, uitgaven en kapitaalafschrijvingen. Alleen werken we hier met thermische kilowatturen in plaats van met guldens of dollars.
De opbrengst (inkomsten) is heel eenvoudig aan te geven. Een kernenergiecentrale van 1.000 MW(e), die werkt met een belastingsgraad van 75% en een warmteomzettingsfactor van 0,32, produceert per jaar ca. 20 miljard kWh warmte, waaruit hij 6,6 miljard kWh elektriciteit maakt. Het feit dat de warmtebron hier splijtend uranium is en in andere elektriciteitscentrales gas, olie of steenkool, doet er hier niet toe. Het is wel van belang voor de betalingsbalans van ons land, of voor de grondstoffeneconomie, of voor onze politieke onafhankelijkheid. Het zal een ieder duidelijk zijn, dat waar men de kachel met uranium stookt, men bespaart op het gebruik van fossiele brandstof. In feite bespaart één zo'n kernenergiecentrale 2 miljoen ton olie.* Dat is de inhoud van tien grote olietankers van elk 200.000 ton.
Natuurlijk is er niet alléén winst. Elke centrale gebruikt zelf 5% van de opgewekte elektriciteit voor zijn interne bedrijf, wat overeenkomt met 330 kWh elektrisch.
Ook de fabriek in Almelo heeft energie nodig voor het leveren van verrijkt materiaal. Dat kost, om één 1.000 MW(e) centrale gedurende één jaar te laten draaien:

* Eén barrel olie (159 liter) geeft bij verbranding 1.500 kWh thermische warmte.

voor scheidingsarbeid	23 miljoen kWh elektriciteit.
en aan afschrijving	18 miljoen kWh thermisch.
Omgerekend en tezamen is dit:	87 miljoen kWh thermisch.
Diffusie kost tienmaal zoveel.	

De opwerkingsfabriek in La Hague gebruikt nog geen 10 miljoen kWh thermisch, de splijtstofelementenfabriek 7 miljoen en de chemische omzetting in UF_6-gas 18 miljoen. Kortom, deze hele industrie gebruikt op jaarbasis ongeveer 122 miljoen kWh thermisch; dat is ruim een half procent van de warmteproduktie in de centrale.
Het mijnbedrijf, het malen van de rotsen en de chemische opwerking tezamen kosten momenteel, bij een ertsgehalte van 0,1%, jaarlijks 150 miljoen kWh thermisch. Dit is dus meer dan de industriële verwerking, maar toch ook minder dan 1% van de warmteproduktie in de reactor. Als men echter in de verdere toekomst, over twintig jaar, naar armere ertsen (0,01 à 0,02%) moet omzien, dan ziet het er naar uit dat het energieverbruik kan stijgen tot 2 miljard kWh thermisch per jaar. Dit zou dan 10% zijn van wat de reactor zelf opbrengt. Dan zijn er voor meer dan honderd jaar reserves aanwezig (5). De cijfers over het mijnbedrijf zijn ontleend aan Zuidafrikaanse rapporten (6) over de goudwinning, waarbij het uranium bijprodukt is. Voorlopig zal van het winnen van uraniumertsen van lage concentratie om economische redenen geen sprake zijn. Er is immers nog veel erts van 0,1 à 0,2% aanwezig. Wel levert Zuid-Afrika dit uranium als bijprodukt van de goudwinning.
Tenslotte de opwerking en de opslag van de 800 kg splijtprodukten die na een jaar in La Hague vrijkomen. De hoeveelheid warmte die door de radioactiviteit van dit één jaar oude materiaal vrijkomt is minder dan 1 miljoen kWh thermisch per jaar. Wat betekent dit nu eigenlijk? Het komt overeen met een continue koeling van minder dan honderd straalkachels, elk met een vermogen van 1 kW. Dat is geen onoverkomelijk technisch probleem. Deze 800 kg radioactief materiaal moet natuurlijk veilig opgeborgen worden. Dat kan men doen door verglazing. Daarvoor zijn dan 100 ton glas per jaar nodig, wat volgens tabel I minder dan 1 miljoen kWh thermisch vraagt (dat is 0,005% van de energie-opbrengst van de reactor).
Een andere manier is het afval op te slaan in stalen cylinders van elk 50 ton ijzer. Dit is perfect veilig en vereist vijf cylinders per jaar. We zagen reeds dat dit maximaal 5 miljoen kWh thermisch vraagt. Dan kan men deze cylinders op zeer beperkt terrein gewoon in een weiland opslaan. Een schuur van 100 bij 100 meter en 10 meter hoog is voor twintig jaar opslag genoeg, als er in Nederland tien kernenergiecentrales van elk 1.000 MW(e) zouden staan. Men kan in die schuur volstaan met natuurlijke luchtkoeling.
Tenslotte is er dan nog de vraag: wat te doen met een kernenergiecentrale die vijfentwintig jaar oud is en vervangen moet worden door een modernere versie (7, 8, 9). In het voorgaande is bij de berekening van de energie-inhoud van een kerncentrale reeds in detail beschreven waaruit deze centrale bestaat. Het eigenlijke reactorvat is het enige radioactief besmette deel. Dit deel kost 10% van de totale kostprijs van de kernenergiecentrale en is betrekkelijk klein van omvang. Er is geen enkel bezwaar tegen om deze ketel veertig jaar lang apart te zetten. De rest van de centrale kan afgebroken worden zoals elke kolencentrale afgebroken wordt. De laatste paar jaar zijn een aantal kostprijsberekeningen gedaan (7) die uitkomen op maximaal 10% van de bouwkosten van een nieuwe centrale. Dat zou volgens de *BNP-kWh*-regel 400 miljoen kWh thermisch betekenen, ofwel 2% van één jaar energieproduktie. Verdeeld over vijfentwintig jaar reactorbedrijf betekent dit minder dan 0,1% per jaar. Uiteraard zijn alle kostprijsberekeningen gebaseerd op normaal bedrijf en is geen rekening gehouden met een ongeluk zoals in Harrisburg.
Samengevat ziet het totale jaarlijkse energieverbruik plus de jaarlijkse energie-

afschrijving in de splijtstofcyclus van een 1.000 MW(e) centrale van het lichtwater-reactortype er als volgt uit:*

1) Het verbruik in de centrale is 5% van de elektriciteitsproduktie, wat overeenkomt met	1.000 miljoen kWh thermisch
2) Het mijnbedrijf plus de ertswinning op basis van uraniumconcentraties in de rots van 0,1%, vragen	150 miljoen kWh thermisch
3) Verrijking met behulp van ultracentrifuges	70 miljoen kWh thermisch
4) Chemische omzettingen, opwerking in La Hague en fabricage van splijtstofelementen tezamen	35 miljoen kWh thermisch
5) Verwerking en opslag van kernafval na opwerking in La Hague	6 miljoen kWh thermisch
6) Afschrijving van geïnvesteerde energie van de kernenergiecentrale (in vijfentwintig jaar) en in de rest van de cyclus (in vijftien jaar)	220 miljoen kWh thermisch
7) Sloop en decontaminatie van de reactorketel, af te schrijven over vijfentwintig jaar reactorbedrijf	20 miljoen kWh thermisch
Totaal energieverbruik per jaar	1.500 miljoen kWh thermisch

Dit is 7,5% van de door de reactor geproduceerde warmte-energie (thermisch). Hiervoor zijn 1 miljoen vaten olie per jaar nodig (2). De warmte-opbrengst in het reactorvat bedraagt 13 miljoen vaten olie equivalent per jaar.

Nabeschouwing

Over het energie-rendement

De energie-economie van de uraniumsplijtstofcyclus, gebaseerd op lichtwaterreactoren van 1.000 MW elektrisch vermogen, is buitengewoon gunstig. Het rendement is 92,5%. Voor de oliecyclus is dit ca. 80 en voor de kolencyclus ca. 70%. Alleen gas schijnt met uranium te kunnen wedijveren. Deze enorme verschillen komen voort uit de omvang van de te verwerken hoeveelheden grondstoffen. Een kolencentrale van 1.000 MW consumeert *per uur* 400 ton steenkool en maakt daar dan o.a. 20 ton as van. Een LWR -kerncentrale gebruikt 144 ton natuurlijk uranium *per jaar*. Dit betekent dat in de kolencyclus volumina moeten worden verwerkt die meer dan tienduizend maal zo groot zijn als die in de uraniumcyclus.
Als over een aantal – wellicht vijfentwintig – jaar de rijkere uraniumvoorraden (0,1 procent) in de rotsen op zijn en men concentraties van 0,01 of 0,02% zal gaan winnen, dan zullen veel grotere hoeveelheden rots moeten worden verwerkt. Hierdoor zal het energie-rendement van de uraniumcyclus dalen tot ca. 85% en vergelijkbaar worden met dat van olie. De uraniumvoorraden op basis van 0,02% in de rotsen zijn voldoende voor een paar honderd jaar.

Draaien kernenergiecentrales op olie?

Na het voorgaande is deze vraag heel eenvoudig te beantwoorden met ja. Om één 1.000 MW(e) centrale in bedrijf te houden, bij 75% belasting, zijn in de gehele splijtstofcyclus verspreid over het oppervlak der aarde nodig: 1 miljoen vaten olie per jaar. Dit betekent dat de warmte die bij verbranding van één miljoen vaten olie (equivalent) vrijkomt, *nodig* is om de hele uraniumcyclus, inclusief de kerncentrale, lopende te houden. Wat er echter wel bij verteld moet worden is dat de thermische warmte-energie die ten gevolge van deze cyclus binnen in de kernreactor *gepro-*

duceerd wordt, overeenkomt met die welke vrijkomt bij verbranding van 13 miljoen vaten olie per jaar (2 miljoen ton olie-equivalent). Op basis van 35 dollar per vat olie betekent dit een bedrag van 466 miljoen dollar per jaar. Deze 13 miljoen vaten olie behoeven niet in Nederland te worden ingevoerd. Hier is dus sprake van een besparing op de olie-import en op de betalingsbalans. De benodigde 144 ton uranium (zie figuur 3) kost 15 miljoen dollar per jaar op de wereldmarkt.
De in de Energienota 1980 vermelde bedragen (ca. 2 miljard gulden), nodig voor de bouw van één 1.000 MW elektrische kerncentrale, worden dus door middel van de besparing op de betalingsbalans in ruim twee jaar terugverdiend.

Referenties

(1) P.F. Chapman c.s., *Research Report ERG 005,* Open University Milton Keynes, September 1974. P.F. Chapman c.s., The Energy Cost of Fuel, *Energy Policy,* September 1974, blz. 231.

(2) J.W. Storm van Leeuwen, Ook Kerncentrales Draaien op Olie, *Intermediair,* 16e jrg., 12 september 1980.

(3) J. Kistemaker, *Energie-analyse van de Totale Kernenergiecyclus met LWR Reactoren,* LSEO/FOM Instituut, Amsterdam 1975.

(4) *Nota Energiebeleid*; deel 3, Brandstof Inzet van Centrales, Ministerie van Economische Zaken, 's-Gravenhage 1980. Hoofdstuk 10, blz. 27.

(5) *Waste Management and Disposal.* Report of INFCE Working Group 7, International Atomic Energy Agency, Wenen 1980.

(6) Nuclear Fuels Corporation (NUFCOR), Southern Africa, *Mining Annual Review 1977,* blz. 433-437.

(7) M.M. Osterhout (ed.), *Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities,* Plenum Press 1980. Zie de artikelen van R.R. MacDonald, blz. 695-708 en J.S. Ferguson, blz. 751-760.

(8) T.S. La Guardia, Nuclear Power Reactor Decommissioning, *Nuclear Safety 20* (1979) 1, blz. 15-23.

(9) R.I. Smith c.s., *Technology, Safety and Costs of Decommissioning a PWR Nuclear Power Station,* NUREG/CR-0130, 1978, Vol. 1 and 2.

27. DE KOSTEN VAN KERNENERGIE

R.W. Vellema

In dit hoofdstuk komen de kosten aan de orde, die in Nederland voor kernenergie betaald moeten worden, indien het besluit zou worden genomen om over te gaan tot de verdere invoering ervan. De feitelijke kosten van de enige commerciële kernenergie-eenheid die we momenteel hebben zijn reeds in hoofdstuk 4 besproken. Al is het probleem van de kosten verwant aan dat van de hiervoor behandelde energiebalans, toch liggen de moeilijkheden enigszins anders. Het blijkt al snel dat de voornaamste kosten zitten in de investeringssfeer. De produktiekosten per kWh hangen dus voor een belangrijk deel af van de afschrijvingstermijn, de rentevoet en de bedrijfstijd van de centrale. In dit hoofdstuk worden de zogenaamde 'eerste-jaars-kosten' berekend, gebaseerd op de marktrente. Ook wanneer die zeer hoog is blijkt kernenergie een aantrekkelijk alternatief te zijn voor steenkool en olie of gas om elektriciteit op te wekken. De genoemde kosten, die luiden in prijzen van medio 1981, bevatten voldoende reserveringen voor de toekomstige afvalopslag en de afbraak van de centrales.

Dit hoofdstuk heeft tot onderwerp de kosten van kernenergie. Omdat in het algemeen dit aspect als het grote voordeel van kernenergie boven andere vormen van elektriciteitsopwekking wordt genoemd, ligt het voor de hand om bij de berekening van de kosten van een kilowattuur (kWh) uit een kernenergie-eenheid niet te volstaan met de absolute getallen, maar ze daarnaast te relateren aan de produktiekosten van elektriciteit die op een andere wijze is opgewekt. Tenslotte is het van belang een idee te krijgen van de te verwachten ontwikkeling van de verschillende kostencomponenten bij de onderscheiden produktiemethoden. Weliswaar zijn de prijsverhoudingen van vandaag de dag een belangrijk gegeven; minstens zo belangrijk zijn de kosten en de mogelijke veranderingen daarin gedurende de gehele economische levensduur van de te beschouwen systemen.

De kostencomponenten van kernenergie

Bij de produktie van elektriciteit in een kernenergiecentrale kunnen de volgende kostencomponenten worden onderscheiden:
- kapitaalslasten van de investering;
- splijtstofkosten;
- kosten van opwerking van de gebruikte splijtstof;
- kosten van de definitieve opslag van het radioactieve afval;
- kosten van onderhoud en bediening;
- ontmantelingskosten.

Sommige kostencomponenten zijn onafhankelijk van de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit; ze luiden in een bedrag per kilowatt per jaar en kunnen pas in een aantal centen per kilowattuur (kWh) worden vertaald als bekend is hoeveel kWh per kW worden geproduceerd in een bepaald jaar, met andere woorden met behulp van de bedrijfstijd. De getallen die in dit verband in de verschillende publicaties worden gehanteerd wijken nogal van elkaar af. Feit is echter dat de Nederlandse kernenergiecentrales al jaren achtereen een zeer hoge bedrijfstijd hebben gerealiseerd. De Nederlandse kernenergiecentrales in Dodewaard en Borssele heb-

ben van 1975 tot en met 1981, 24.806 gigawattuur (GWh) elektriciteit geproduceerd. Bij een opgesteld vermogen van ruim 495 MW betekent dit een gemiddelde bedrijfstijd van ruim 7.150 uur per jaar. De bedrijfstijd was het laagst in 1975 (6.385 uur per jaar), en het hoogst in 1980 (7.932 uur per jaar). Deze cijfers steken daarmee zeer gunstig af ten opzichte van de buitenlandse cijfers. Dit mag echter geen reden vormen om voor nog te bouwen Nederlandse centrales de buitenlandse cijfers te hanteren. Rekening houdende met de stops in verband met splijtstofwisselingen, onderhoud en revisies (die overigens ook in bovengenoemde cijfers zijn verwerkt) is een bedrijfstijd van 6.000 à 7.000 uren per jaar voor ons land als een reëel gegeven te beschouwen. Om aan de voorzichtige kant te blijven, zal worden gerekend met 6.000 uren per jaar.

Investeringskosten
Bij de vele bedragen die worden genoemd als investeringskosten van kernenergiecentrales (en de grote verschillen die daarin zijn te constateren) moet worden bedacht dat het daarbij veelal gaat om eenheden die op verschillende momenten in bedrijf zijn gesteld en die qua eenheidsgrootte verschillen vertonen. Bovendien zijn belangrijke onderdelen zoals bijvoorbeeld bouwrente de ene keer wel en de andere keer niet verwerkt. Het is momenteel niet mogelijk gebruik te maken van recente offertes die betrekking hebben op binnenkort in ons land te bouwen kernenergiecentrales. Rekening houdende met de uit het buitenland bekende cijfers en de eerder in ons land verrichte studies, lijkt een investeringsbedrag van 3.100 à 3.700 gulden per kW (*inclusief* bouwrente) een realistische benadering van de investeringskosten voor een in 1981 in bedrijf gestelde kernenergiecentrale met een vermogen van circa 900 MW. Van een 600 MW-eenheid zullen de kosten hoger zijn, omdat in het buitenland is bewezen dat er tussen 600 en 900 à 1.000 MW nog schaalvoordelen zijn te behalen. Het optimum zal afhangen van aspecten zoals investeringskosten, beschikbaarheid, koelwatermogelijkheden, inpasbaarheid in de infrastructuur etc. In dit hoofdstuk wordt verder gerekend met de genoemde 3.100 à 3.700 gulden per kW (guldens van 1981, inclusief bouwrente) voor een in 1981 in bedrijf gestelde eenheid.
Uitgaande van een economische levensduur van twintig jaar, bedragen de kapitaallasten:
- bij 8% rente: 5,8 cent per kWh;
- bij 10% rente: 6,65 cent per kWh;
- bij 12% rente: 7,6 cent per kWh.

Splijtstofkosten
Bij een uraniumprijs van 250 gulden per kg bedragen de kosten van het verrijkte uranium en de elementenfabricage ongeveer 1,3 cent per kWh. Van deze 1,3 cent is 45% voor het uranium zelf, 3% voor de conversie, 35% voor de verrijking en 17% voor de elementenfabricage.

Opwerkingskosten
In de Nederlandse situatie is het momenteel niet mogelijk om de verschillende berekeningen over de kosten van opwerking te toetsen aan datgene wat daarover contractueel is overeengekomen tussen de Nederlandse kernenergie-exploitanten en buitenlandse opwerkingsbedrijven. De meest realistische berekening van de opwerkingskosten is, voor zover onze informatie strekt, die welke resulteert in 0,9 cent per kWh (1). Deze kosten zijn gebaseerd op een opwerkingsprijs van 1.875 gulden per kg.

Kosten van definitieve opslag van het radioactieve afval
De in het reeds geciteerde artikel genoemde kosten voor definitieve opslag van 0,04

cent per kWh hebben als uitgangspunt dat het afval van ongeveer vijfentwintig centrales van 1.000 MW in één zoutmijn kan worden opgeborgen. In deze berekeningen zal echter worden uitgegaan van de veronderstelling dat een in Nederland aan te leggen zoutmijn in eerste instantie het in ons land geproduceerde afval te verwerken krijgt. De kosten van de mijn worden dan omgeslagen over de hoeveelheid elektriciteit die door circa 2.500 MW kernenergie-centrales wordt opgewekt. De kosten per kWh worden dan tienmaal hoger en komen uit op 0,4 cent per kWh.

Kosten van onderhoud en bediening
Op grond van ervaringscijfers uit het buitenland en de in ons eigen land optredende kosten, is een bedrag aan onderhouds- en bedieningskosten van 75 à 85 gulden per kW per jaar als reële schatting te betitelen. Bij een bedrijfstijd van 6.000 uur per jaar bedraagt deze kostencomponent 1,3 cent per kWh.

Ontmantelingskosten
Vrij algemeen wordt voor de ontmantelingskosten een percentage van 10 à 15% van het oorspronkelijke investeringsbedrag aangehouden, als representatief voor een verantwoorde wijze van ontmanteling. Dit in de toekomst te betalen bedrag kan contant worden gemaakt naar het tijdstip van inbedrijfstelling, mits men rekening houdt met het feit dat de ontmantelingskosten aan inflatie onderhevig zijn. De annuïteit van dit bedrag, jaarlijks toegevoegd aan een daartoe gecreëerde voorziening, zal aan het eind van de afschrijvingstermijn, door de verrichte rentebijschrijving over deze vermogenscomponent, zijn opgelopen tot een zodanige omvang dat daaruit de inmiddels geïnfleerde kosten van ontmanteling kunnen worden gedekt. De aldus berekende ontmantelingskosten bedragen derhalve:
- bij 8% rente: 0,3 cent per kWh
- bij 10% rente: 0,35 cent per kWh
- bij 12% rente: 0,4 cent per kWh.

Totaal van de kostencomponenten
De totale kosten van een kWh opgewekt met behulp van kernenergie komen daarmee op:

kapitaallasten van de investering	6,65 cent per kWh
splijtstofkosten	1,3 cent per kWh
opwerking	0,9 cent per kWh
definitieve opslag	0,4 cent per kWh
onderhoud/bediening	1,3 cent per kWh
kapitaallasten van de ontmanteling	0,35 cent per kWh
totaal	10,9 cent per kWh

De kapitaallasten zijn daarbij berekend met een annuïtaire afschrijving à 10% over twintig jaar. Weliswaar was de rentevoet tot voor kort hoger. Gelet op het Nederlandse inflatiepercentage van 6 à 7% per jaar, ligt het in de lijn der verwachting dat de rente op den duur weer zal gaan tenderen naar het niveau van 10%.

Reële rente versus marktrente
Sprekende over de gehanteerde rentevoet is het wellicht raadzaam toe te lichten waarom in dit hoofdstuk niet is gerekend met de in sommige evaluaties gebruikte zogenaamde 'reële rentevoet' van circa 4%. Deze rentevoet – de marktrente gecorrigeerd voor de in de rente opgenomen inflatievergoeding – is een zeer bruikbaar instrument ter eerste beoordeling van verschillende alternatieve manieren waarop

men geld kan investeren ter bereiking van een of ander doel. Dat doel kan zijn elektriciteit opwekken, energie besparen, twee steden per spoor verbinden, een zeearm afsluiten, etc. Met de reële rentevoet kan dan op vrij doorzichtige wijze worden onderzocht of een project 'zijn geld opbrengt' en welk project het meest rendabel lijkt. Daarna zal echter moeten worden onderzocht of zo'n op zich rendabel project eigenlijk wel te financieren is – dat hangt af van de marktrente – en hoe gevoelig zo'n project is voor bepaalde wijzigingen in de onderlinge prijsverhoudingen tussen de verschillende kostencomponenten en andere belangrijke variabelen. Slechts op grond van zo'n verdergaande evaluatie zal een verantwoorde beslissing kunnen worden genomen.
Berekeningen met de reële rentevoet en de 'kostprijzen' die daaruit resulteren zijn niet maatgevend voor de kosten waarmee men in de harde werkelijkheid van inflatie en hoge marktrente wordt geconfronteerd. Deze kosten moeten echter wel worden opgebracht, en in dit hoofdstuk wordt daarom berekend wat een consument van een kWh uit een kernenergiecentrale op zijn elektriciteitsnota mag verwachten. De kostprijs is in dit verband vanzelfsprekend beperkt tot de produktiekosten, omdat transport- en distributiekosten een kostenelement vormen dat grotendeels los staat van het gekozen produktiesysteem.

De kosten van elektriciteit geproduceerd in conventionele centrales

Ter vergelijking van de kostprijs van een kWh uit een kernenergiecentrale wordt in deze paragraaf berekend welke kosten zijn gemoeid met de elektriciteitsopwekking in een eenheid die wordt gestookt met fossiele brandstoffen (kolen, olie, gas). De kostencomponenten beperken zich dan tot het volgende drietal:
- kapitaallasten van de investering;
- onderhouds- en bedieningskosten;
- brandstofkosten.

De berekeningen zijn gebaseerd op ervaringscijfers die betrekking hebben op de Nederlandse elektriciteitsvoorziening, eventueel aangevuld met buitenlandse cijfers.

Investeringen

De investeringskosten van nieuw te bouwen kolen-, respectievelijk olie/gasgestookte eenheden bedragen bij benadering 1.700 à 1.900 gulden en 1.200 à 1.400 gulden. Deze bedragen zijn inclusief bouwrente en inclusief de voorzieningen die moeten worden getroffen in het kader van milieu-eisen (rookgasontzwaveling e.d.). Bij een bedrijfstijd van 5.700 uur per jaar (kolen- of olie/gasgestookte eenheden hebben in ons land een lagere bedrijfstijd dan nucleaire eenheden) zijn de kapitaallasten per kWh:
- kolen-eenheden: 3,7 cent per kWh;
- olie/gas-eenheden: 2,7 cent per kWh.

Ook deze kapitaallasten zijn berekend op basis van een 10%-annuïteit over twintig jaar.

Onderhoud en bediening

De onderhouds- en bedieningskosten voor kolen- respectievelijk olie/gaseenheden bedragen minimaal 50 en 36 gulden per kW per jaar. De kosten bij koleneenheden zijn vooral hoger als gevolg van de kolen-*handling* en de kosten van de rookgasreinigingsinstallatie en de verwerking van de daarbij vrijkomende afvalstoffen. De kosten per kWh bedragen:
- kolen-eenheden: 0,9 cent per kWh;
- olie/gaseenheden: 0,6 cent per kWh.

Brandstofkosten
Voor nieuw te bouwen eenheden met rookgasreiniging mag een gemiddeld jaarrendement van 39% worden verwacht. De huidige brandstofprijzen bedragen ruim 200 gulden per ton kolen en ca. 500 gulden per ton stookolie. De kosten per gigajoule (GJ) zijn derhalve 8 gulden per GJ voor kolen en 12 gulden per GJ voor olie en het aan dat prijsniveau gekoppelde aardgas. Per kWh bedragen de brandstofkosten:
- kolen-eenheden: 7,4 cent per kWh;
- olie/gaseenheden: 11,1 cent per kWh.

Kostenvergelijking
In tabel I is weergegeven hoe de verschillende produktiekosten zich verhouden bij kernenergie-, kolen- en olie/gas-eenheden.

Tabel I. Kosten per kWh in respectievelijk een kernenergiecentrale, een kolen- en een olie-/gas-gestookte centrale.

	kernenergie ct/kWh	kolen ct/kWh	olie/gas ct/kWh
kapitaallasten	7,0	3,7	2,7
onderhoud/bediening	1,3	0,9	0,6
brandstofkosten resp. splijtstofcycluskosten	2,6	7,4	11,1
totaal	10,9	12,0	14,4

Uit dit overzicht blijkt dat bij een rentevoet van 10% elektriciteit uit kernenergie goedkoper is dan het meest voor de hand liggende alternatief, elektriciteit uit een kolen-centrale. Het *break-even-point* wordt bereikt bij een rentevoet van bijna 15%. Bij dat niveau zijn de produktiekosten van kernenergie (9,4 cent per kWh kapitaallasten + 3,9 cent per kWh overige kosten = 13,3 cent per kWh), gelijk aan de kosten van een kolen-kWh (5,0 cent per kWh kapitaallasten + 8,3 cent per kWh overige kosten = 13,3 cent per kWh). Voor iedere lagere rentevoet dan 15% is kernenergie al vanaf het eerste bedrijfsjaar goedkoper dan een koleneenheid.
Uit de figuur blijkt het hoge aandeel van de vaste kosten bij kernenergie-centrales. Indien men bedenkt dat deze kostencomponent verder niet aan inflatoire invloeden onderhevig is, in tegenstelling tot de overige kostencomponenten, dan zijn de economische voordelen van de toepassing van kernenergie nog markanter.
Bij een brandstofprijsstijging van bijvoorbeeld 10% loopt het kosten-voordeel van kernenergie ten opzichte van kolen op van 1,1 tot 1,6 cent per kWh, dat is een toeneming met ruim 45%. Indien de kolenprijs het vaak genoemde niveau zou bereiken van 80% van de olie-prijs (beide per GJ) dan is kernenergie in het eerste bedrijfsjaar al 2,6 cent per kWh goedkoper dan het goedkoopste alternatief.

Samenvattend
Uit het voorgaande moge blijken dat kernenergie reeds bij de huidige prijzen en prijsverhoudingen het goedkoopste produktiesysteem vormt voor de basislast van de elektriciteitsbehoefte. Eerst bij een extreem hoge rentevoet van 15% zijn de 'eerste-jaars-kosten' per kWh gelijk aan die van een kolen-eenheid. Gelet op de verhouding tussen de verschillende kostencomponenten bij de onderscheiden produktiesystemen is het alleszins redelijk te veronderstellen dat de gesignaleerde kosten-

voordelen in de toekomst alleen maar groter zullen worden onder invloed van de stijgende prijzen in het algemeen en die van (fossiele) brandstoffen in het bijzonder.

Referentie

(1) G.A. de Boer, De Kosten van Elektriciteit uit Uranium en uit Kolen, *De Ingenieur*, 26 maart 1981, blz. 9.

Literatuur

Elektriciteit in Nederland, Arnhemse Instellingen van de Elektriciteitsbedrijven, diverse jaargangen.

De Kosten van Kernenergie in Nederland, Koninklijk Instituut van Ingenieurs (KIvI), 1978.

De Toekomstige Energiesituatie in Nederland (TESIN), Vereniging van Directeuren van Elektriciteitsbedrijven in Nederland (VDEN), 1980.

A.A. de Boer, Ingenieurs en de Kosten van Kernenergie. *Economisch Statistische Berichten*, 20 mei 1981, blz. 493.

H. Damveld en J. Boer, Kernenergie duurder dan u denkt. *De Ingenieur*, 25 juni 1981, blz. 22 en naschrift van G.A. de Boer.

A.A. de Boer, Het Juiste Gebruik van Kostprijsberekeningen. *Energiespectrum*, september 1981.

28. MAATSCHAPPELIJKE KOSTEN EN BATEN VAN KERNENERGIE

A. Heertje

Een maatschappelijke analyse van kosten en baten levert geen beslissende uitkomsten op omtrent het te voeren beleid. Wel wordt een overzicht gegeven van de gezichtspunten die de aandacht verdienen. Daarbij gaat het uit economisch oogpunt niet alleen om de aan de exploitatie van aan kernenergie verbonden voor- en nadelen die in geld kunnen worden uitgedrukt, maar ook om immateriële aspecten. In deze beschouwing wordt gepleit voor een nuchtere inventarisatie van de voor- en nadelen die verbonden zijn aan het benutten van kernenergie.

De beslissing, kernenergie als een alternatieve energiebron te benutten, berust in laatste instantie op waarderingsoordelen van politieke en levensbeschouwelijke aard. Een waarderingsoordeel kan mede steunen op verstandelijke overwegingen; het beslissende kenmerk is echter dat het bij een dergelijk oordeel niet gaat om feitelijke constateringen, maar om het tot uitdrukking brengen van wat men vindt dat behoort te gebeuren.
Zo beschouwd kan een maatschappelijke kosten- en baten-analyse van het toepassen van kernenergie geen beslissende uitkomsten opleveren. Het ontwikkelen van een overzicht van de maatschappelijke kosten en baten van de kernenergie is niettemin een belangrijke bouwsteen voor een overwogen eindoordeel. Vooral als men maatschappelijke kosten en baten niet in de beperkte zin van uitsluitend op geld waardeerbare aspecten opvat. Of de aangedragen bouwsteen dan kan worden verbreed tot een fundament hangt vooral af van de inschatting van de onvermijdelijke risico's, die aan de exploitatie van kernenergie zijn verbonden. De heftigheid van de discussie over de kernenergie hangt vooral met dit gezichtspunt samen. Denkbaar is dat risico's van dood en verderf zo hoog worden aangeslagen, dat elk verder redeneren omtrent de pro's en contra's van de kernenergie bij voorbaat is geblokkeerd en als zinloos kan worden getypeerd. Met hen die op grond van de risico's tegen zijn, blijkt in de praktijk een redelijke uitwisseling van denkbeelden niet goed mogelijk. Die discussie is op dit moment een doodlopende weg.

In dit opstel wordt deze weg niet ingeslagen, hoezeer wij ook onderkennen dat zwaarwegende risico's in het geding zijn. Gebleken is echter dat ook aan de exploitatie van andere energiebronnen enorme risico's verbonden zijn. Laten we eens een ogenblik spelen met de gedachte dat kernenergie reeds op grote schaal wordt toegepast en dat dan vervolgens de suggestie wordt gedaan ook naar olie te gaan boren en deze te exploiteren. Ongetwijfeld zouden er dan heftige discussies ontstaan over de nadelige effecten voor het milieu, het opofferen van het landschap aan de aanleg van pijpleidingen en het gevaar van enorme branden op de olietankers. We zijn nu met deze nadelen en risico's vertrouwd, zodat ze minder tot de verbeeldingskracht spreken. Toch zijn ook de bezwaren tegen olie als energiebron niet gering. De politieke gevaren, die verbonden zijn aan de grote afhankelijkheid van de industrielanden van het OPEC-kartel kunnen nauwelijks worden overschat. Bovendien tekent zich de mogelijkheid af dat voor het vraagstuk van het kernafval een oplossing wordt gevonden in de sfeer van de ruimtevaart.

Kosten en opbrengsten van de kernenergie kunnen allereerst in de beperkte zin van in geld waardeerbare offers en resultaten worden beschouwd. In het voorafgaande hoofdstuk is ingegaan op de kostprijs van kernenergie. Die beschouwing speelt zich af op het terrein van de financiële calculatie. Er werd antwoord gegeven op de vraag welke financiële offers verbonden zijn met de investeringen in kernenergie, de exploitatie en het verwerken van afval.
Daartegenover kunnen financiële opbrengsten worden gesteld, die kunnen worden ontleend aan de bijdrage van kernenergie tot de groei van de produktie, de werkgelegenheid en de betalingsbalans. Met een dergelijke financiële calculatie kan tegenwoordig niet worden volstaan, ook al is de uitkomst nog zo positief. Steeds meer raken wij eraan gewend ook allerlei immateriële kanten binnen onze gezichtskring te trekken. Zo wordt op het terrein van de kernenergie de behoefte aan veiligheid als een belangrijke behoefte onderkend. Het voorzien in deze behoefte heeft invloed op de wijze van omgang met de schaarse middelen. Hieruit blijkt al dat economische gezichtspunten niet uitsluitend verbonden zijn met de produktie van materiële goederen en hun prijsvorming op de markt. In het algemeen is het benutten van kernenergie gunstig voor de groei van de produktie, de werkgelegenheid en de betalingsbalans. Wil men van kernenergie geen gebruik maken dan moet wellicht met vermindering van de omvang van de produktie en de werkgelegenheid worden rekening gehouden. Daaruit vloeit echter niet voort dat het toepassen van kernenergie op economische gronden geboden is. Bedrijfseconomen, die dergelijke voorbarige conclusies wel eens trekken, hebben daarbij een veel te beperkte opvatting van het karakter van de economie voor ogen. Zij denken dan dat het uitsluitend gaat om het evalueren van offers en opbrengsten, die in de noemer van het geld kunnen worden uitgedrukt en zodoende kunnen worden vertaald in markttransacties.

Het economische gezichtspunt is niet beperkt tot die aspecten welke in geld kunnen worden uitgedrukt en derhalve in het markt- en prijsmechanisme zijn ingebed. In de economie gaat het om het bevredigen van behoeften, voorzover dit afhankelijk is van het omgaan met schaarse produktiemiddelen. Het welvaartsbegrip is formeel en subjectief. Het formele karakter heeft betrekking op het feit dat er alles onder valt, wat geacht wordt eronder te vallen. De welvaart kan niet worden opgehangen aan een concrete maatstaf, zoals de produktie per hoofd of de voorziening met duurzame consumptiegoederen. Als de mensen vinden dat het benutten van kernenergie een negatief effect heeft op hun behoeftenbevrediging, dan hoort dit gezichtspunt tot de welvaartseffecten. Het subjectieve karakter van het welvaartsbegrip heeft betrekking op de afhankelijkheid van de subjectieve waarderingen van de individuen.
Het is heel goed denkbaar dat een bedrijfseconomische calculatie alsmede een macro-economische becijfering waarin werkgelegenheidseffecten en groei zijn verwerkt, beide een positief saldo opleveren terwijl toch de welvaart in de ruime zin daalt door het invoeren van kernenergie. Een dergelijke afkeuring kan niet op de markt tot uitdrukking worden gebracht. Het marktmechanisme is een belangrijke methode van besluitvorming omtrent de aanwending van schaarse middelen, maar het is niet de enige methode. Aan de politieke beslissingen en aan de onder druk van de politieke opinie tot stand gekomen besluiten zijn ook economische aspecten verbonden. Als de burgers langs de weg van een brede maatschappelijke discussie naar voren willen brengen te willen afzien van het gebruik van kernenergie, heeft deze afkeuring ook een economisch aspect. Dat is dat met het oog op het voorzien in de behoefte aan energie geen beslag gelegd wordt op middelen die kernenergie, en wel op middelen die alternatieve energie opleveren. De geuite afkeuring heeft derhalve invloed op de allocatie van de produktiemiddelen.
Men kan daarom deze situatie niet afdoen met de uitspraak: ‘Economisch is kern-

energie het beste, maar sociale en politieke factoren blokkeren deze keuze.' Het is niet de uitkomst van een gevecht tussen economische en sociale factoren, waarbij de economische krachten positief en de sociale krachten negatief gericht zijn. Zowel aan het toepassen als het niet toepassen van kernenergie kleven voor- en nadelen, die ten dele financieel calculeerbaar zijn, maar overwegend worden ontleend aan het concretiseren van de subjectieve behoeftenbevrediging in het kader van het ruime welvaartsbegrip.
Het is mogelijk dat de burgers bij het uiten van voorkeuren gezichtspunten over het hoofd zien, die deskundigen van grote betekenis achten. Zo brengt het afzien van de exploitatie van kernenergie met zich mee dat de beschikbare technische kennis op dit terrein niet verder wordt uitgebreid. We lopen in Nederland dan een achterstand op, die ook op andere terreinen van toegepast wetenschappelijk onderzoek nadelige uitstralingseffecten kan hebben. Zou men op een later tijdstip alsnog besluiten kernenergie in te voeren dan kan het tekort aan technische kennis een ernstige hinderpaal vormen.
Vergeleken met het gezichtspunt van de technische ontwikkeling krijgt de mogelijke vervuiling van het milieu als gevolg van het toepassen van kernenergie wel grote aandacht. Warmte-ontwikkeling, radioactiviteit, straling en radioactief afval kunnen in dit verband als mogelijke factoren genoemd worden, waardoor nadelige milieu-effecten zouden kunnen optreden. Vaak wordt met de gedachte gespeeld het radioactieve afval diep onder de grond te stoppen. Velen hebben moeite met deze gedachte, omdat zij menen dat vroeg of laat toch ontoelaatbare straling gaat optreden. Daarom lijkt een meer fundamentele oplossing te worden geboden door de ruimtevaart. Op den duur moet het mogelijk zijn het afval van kerncentrales met satellieten terug naar de zon te sturen. In dat geval zou men minder zwaar hoeven te tillen aan het afval-vraagstuk. Opnieuw geldt dat niet zozeer de objectieve mogelijkheden, maar de subjectieve beleving uiteindelijk de doorslag geeft. Als men bang is dat in de ruimte een ongeluk zou kunnen optreden, waardoor het kernafval toch weer op aarde – en dan ongecoördineerd – terugkeert, zal men ook deze oplossing van een ernstig vraagstuk van de hand wijzen.
Als we ervan uitgaan dat de traditionele energiebronnen geleidelijk uitgeput raken, waardoor een belangrijke terugval van produktie, werkgelegenheid en groei dreigt, dan lijkt vooral een antwoord geboden op de vraag of men de prijs voor het afwijzen van kernenergie in feite wil betalen. Wordt de dan te verwachten grootschalige verarming manmoedig aanvaard of blijkt dan dat men de consequenties van de negatieve voorkeur niet heeft overzien? Vaak neemt men in dit verband waar dat nog een diepe kloof gaapt tussen het uiten van wensen en het aanvaarden van de consequenties van de geformuleerde eisen. Zo wordt met de mond wel beleden dat de werkloosheid bestreden moet worden, maar de bereidheid om daarvoor offers te brengen ontbreekt. Het lijkt niet uitgesloten dat men de kernenergie als energiebron afwijst, zonder te beseffen of te willen beseffen, dat dan een belangrijke terugval in levenspeil moet worden aanvaard. Zo beschouwd is het afwijzen van kernenergie maatschappelijk niet verenigbaar met de hardnekkigheid waarmee in feite steeds weer aan enige groei ofwel het handhaven van de koopkracht wordt vastgehouden. Dergelijke inconsequenties leiden tot frustraties, spanningen en politieke calamiteiten waaruit hoge maatschappelijke kosten voortvloeien. Er zijn derhalve niet alleen maatschappelijke kosten en baten verbonden aan de exploitatie van kernenergie, maar evenzeer aan het niet benutten van kernenergie.

Tegen deze achtergrond kan nog iets nader worden ingegaan op de positie van de toekomstige generaties. De huidige generatie kan zich bij de afweging mede laten leiden door het veronderstelde belang van toekomstige generaties. Er kan worden verondersteld dat het toepassen van kernenergie nu, in de toekomst ernstige nadelen met zich meebrengt voor de dan levenden. Deze kosten kunnen nu in de maat-

schappelijke calculatie worden verwerkt. Maar er kan ook worden aangenomen dat het niet invoeren van kernenergie nu, zal leiden tot een grootscheepse verarming van de toekomstige generatie. Een dergelijke verarming zal in het algemeen negatief worden gewaardeerd en derhalve een kostenpost vormen van het niet benutten van kernenergie.

Een bijzonder gezichtspunt wordt in dit verband nog gevormd door de internationale aspecten. Tegenstanders van het exploiteren van kernenergie krijgen vaak tegengeworpen dat andere landen wel van kernenergie gebruik maken, waardoor deze landen een grote voorsprong hebben in de internationale concurrentiestrijd. Volgens dit argument kan Nederland zich niet veroorloven achter te blijven, ook al zou men dat willen. Er gaat van deze overweging meestal iets dwangmatigs en onvermijdelijks uit. Toch leert de op het ruime welvaartsbegrip steunende maatschappelijke kosten-baten-analyse dat het ook in dit geval gaat om het afwegen van de voor- en nadelen, die samenhangen met het niet volgen van wat internationaal gebruikelijk is. Als de hele wereld op kernenergie overgaat kan Nederland best een andere gedragslijn volgen. Men zal zich alleen bewust dienen te zijn van de prijs, die voor het vermijden van de kernenergie wordt betaald. Die prijs wordt o.m. gevormd door een lagere produktie en minder werkgelegenheid dan mét het toepassen van kernenergie zouden resulteren. Maar, zoals gezegd, de mensen kunnen het betalen van die prijs meer dan de moeite waard vinden.

Deze korte aanduiding van het internationale gezichtspunt demonstreert opnieuw het centrale thema van onze bijdrage: uit de opsomming van maatschappelijke kosten en baten vloeit geen beslissing voort. Het nut van deze analyse schuilt niettemin in de gespecificeerde inventarisatie van materiële en immateriële, korte en lange-termijn-, nationale en internationale voor- en nadelen. De besluitvorming omtrent de kernenergie kan dan ook alleen maar een weloverwogen beslissing opleveren, indien deze steunt op de maatschappelijke kosten- en baten-analyse. Met minder kan men niet volstaan en meer is niet nodig.

29. DE VREEDZAME TOEPASSING VAN KERNENERGIE EN HET NON-PROLIFERATIEBELEID

P.H. Kooijmans

Reeds in hoofdstuk 8 kwam aan de orde, dat de civiele toepassing van de kernenergie raakvlakken heeft met de militaire toepassing. Wil men het risico van een oorlog waarin kernwapens zouden worden gebruikt beperken, dan moet het aantal landen dat over die wapens beschikt beperkt gehouden worden. Waar de civiele kerntechnologie zich verder over de wereld verspreidt, zijn voorwaarden aanwezig die de groei van dit aantal vergemakkelijken. Ging het in het genoemde hoofdstuk over de technische voorzieningen tegen de ontvreemding van kernmaterialen, in dit hoofdstuk gaat het over de politieke voorzieningen tegen proliferatie. Het internationale overleg, de afspraken die zijn gemaakt en de verdragen die zijn gesloten kunnen de raakvlakken tussen beide toepassingsgebieden verkleinen, maar niet wegwerken. Terug naar 'af' lijkt onmogelijk. Dit hoofdstuk schetst de ontwikkelingen, waarin het Internationaal Atoomenergie Agentschap, het Non-Proliferatie Verdrag en de probleem-evaluatie van INFCE *een belangrijke rol spelen.*

Onder non-proliferatiebeleid wordt verstaan het streven dat er op gericht is te voorkomen dat het aantal landen dat beschikt over kernwapens in aantal toeneemt. Uitgangspunt en belangrijkste instrument bij dat beleid is nog altijd het Non-Proliferatie Verdrag (in het vervolg aan te duiden als NPV), dat in 1968 werd gesloten na een aantal jaren van moeizaam onderhandelen en dat twee jaar later in werking trad.

Het formele begin van de geschiedenis van de non-proliferatie kan worden gesteld in 1961, toen de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties op voorstel van Ierland een resolutie aanvaardde, waarin werd aangedrongen op de totstandkoming van een verdrag, waarbij kernwapenstaten (1) zich zouden verplichten geen kernwapens te verschaffen aan landen, die nog niet over deze wapens beschikten, terwijl deze laatsten zich op hun beurt zouden moeten verplichten geen kernwapens te zullen vervaardigen of deze wapens op enige andere wijze te verwerven (2).

Met de opstelling van dit verdrag belastte zich de eveneens in 1961 op basis van een akkoord tussen de Verenigde Staten en de Sovjet-Unie in het leven geroepen Geneefse ontwapeningscommissie. De zaak verkreeg een zekere toespitsing toen in 1964 de Chinese Volksrepubliek haar eerste kernproef ondernam. Alhoewel op dat moment de Chinese zetel in de Verenigde Naties en daarmee ook de aan China als grote mogendheid toekomende permanente zetel in de Veiligheidsraad nog werd ingenomen door het op Taiwan zetelende regime van Tsjang-kai-shek, was het toch voor iedereen duidelijk dat nu de club van kernwapenstaten dezelfde was als de club van de door het Handvest van de Verenigde Naties erkende grote mogendheden. Psychologisch was dat van groot belang. Zou nóg een ander land tot de produktie van kernwapens overgaan, dan zou de magische cirkel rondom de vijf grote mogendheden zijn doorbroken en dan zou het tij van een gestaag toenemend aantal kernwapenstaten wellicht niet meer te keren zijn. De Chinese kernproef heeft dan ook gefunctioneerd als een extra stimulans om spoed te betrachten.

De moeilijkheden waren echter niet gering. Hier wordt slechts een tweetal ervan genoemd, omdat die ook thans nog hoogst actueel zijn en nog altijd het succes van het non-proliferatie-streven bedreigen.
Het eerste probleem wordt opgeroepen door het feit dat de hele opzet van het te sluiten verdrag strijdig was (en is) met één van de grondregels van het volkenrecht, namelijk die van de souvereine gelijkheid van staten. Die opzet immers was gericht op de indeling van de landen dezer wereld in twee categorieën: de kernwapenstaten die ook voor de toekomst over die kernwapens zouden mogen beschikken en de andere landen, die zich juridisch zouden verplichten nu en voor de toekomst van kernwapens af te zien. Psychologisch gezien – en in de internationale politiek tellen psychologische argumenten nu eenmaal zwaar – is het moeilijk zich in te laten delen bij een soort tweede garnituur en dit is des te moeilijker naarmate men de verschillen tussen de eigen internationale statuur en die van een aantal landen van de eerste garnituur geringer acht. Zo gezien is het weinig opmerkelijk dat landen als India, Brazilië en Argentinië, die zich geenszins de mindere voelen van ietwat versleten grote mogendheden als Engeland en Frankrijk, geweigerd hebben partij te worden bij het NPV.
Maar ook de landen die wel bereid waren om door deze psychologisch zure appel heen te bijten, terwille van de versterking van internationale vrede en veiligheid, waren daartoe niet onvoorwaardelijk bereid. Zo stelden zij allereerst dat de tweedeling in kernwapenstaten en niet-kernwapenstaten niet voor alle eeuwigheid mocht gelden. Uiteindelijk zouden ook de kernwapenstaten van hun kernwapens afstand moeten doen. Vandaar dat in artikel 6 van het NPV is bepaald dat 'elk van de partijen bij dit verdrag (maar daarmee zijn in de eerste plaats bedoeld de kernwapenstaten, *PHK*) zich ertoe verbindt te goeder trouw onderhandelingen te voeren omtrent doeltreffende maatregelen met betrekking tot spoedige beëindiging van de nucleaire bewapeningswedloop en tot nucleaire ontwapening en omtrent een verdrag inzake algemene en volledige ontwapening onder strenge en doeltreffende internationale controle'.
Men zal onmiddellijk moeten toegeven dat de formulering van dit artikel niet erg scherp is in die zin dat er geen termijn is gesteld, waarbinnen het beoogde resultaat zou moeten worden behaald. In feite wordt geen andere verplichting opgelegd dan het 'te goeder trouw onderhandelen'. Desalniettemin werd deze bepaling door een groot aantal landen (met name van de Derde Wereld) zo uitgelegd dat er nu door de kernwapenstaten effectieve maatregelen tot wapenvermindering zouden moeten worden genomen. Met andere woorden: de verticale proliferatie – het steeds toenemen van het aantal kernwapens in de bestaande kernwapenstaten en het steeds geraffineerder worden ervan – zou moeten worden stopgezet. De aanvaarding van het beginsel van de horizontale non-proliferatie *nu* zou moeten leiden tot de verticale non-proliferatie in de nabije toekomst. Een slechts oppervlakkige beschouwing van de wapenstatistieken van dit moment leert dat deze verwachting is beschaamd. Deze teleurstelling is één van de oorzaken waardoor het non-proliferatie-regime thans in ernstige moeilijkheden verkeert.

Maar de niet-kernwapenstaten hadden nog een tweede pijl op hun boog. Zij realiseerden zich namelijk van meet af aan dat de toepassing van kernenergie voor militaire doeleinden en de daarbij verworven kennis en technische vaardigheden van groot belang kunnen en zullen zijn voor de vreedzame toepassing van kernenergie. Door af te zien van die militaire toepassing zouden zij derhalve wellicht ook in een inferieure positie kunnen geraken voor wat betreft de vreedzame toepassing. Hun bereidheid af te zien van de produktie en het bezit van kernwapens werd dan ook gekoppeld aan de voorwaarde dat hen alle technologie met betrekking tot de vreedzame toepassing van kernenergie ter beschikking zou worden gesteld, onverschillig of deze nu afkomstig is uit de toepassing voor militaire doeleinden of niet (3).

Een en ander staat vermeld in artikel 4 van het NPV, een artikel dat met het reeds genoemde artikel 6 in de praktijk tot de grootste moeilijkheden heeft geleid. In lid 1 staat dat geen enkele bepaling van het verdrag mag worden uitgelegd als van invloed te zijn op het onvervreemdbaar recht van alle partijen bij het verdrag om het onderzoek naar en de produktie en het gebruik van kernenergie voor vreedzame doeleinden zonder discriminatie te ontwikkelen. En in lid 2 wordt alle partijen het recht toegekend deel te nemen aan een zo uitgebreid mogelijke uitwisseling van uitrusting, materialen en wetenschappelijke en technologische gegevens ten behoeve van het vreedzame gebruik van kernenergie, terwijl zij anderzijds zich ertoe verbinden een zodanige uitwisseling te bevorderen.
Het NPV staat dan ook bepaald niet vijandig of zelfs maar wantrouwig tegenover de toepassing van kernenergie voor niet-militaire doeleinden. Integendeel, men zou eerder kunnen zeggen dat het die toepassing aanmoedigt. Zo vermeldt de preambule dat *alle* staten moeten kunnen beschikken over de voordelen van de vreedzame toepassing van kernenergie. Het feit dat sinds de sluiting van het verdrag in 1968 er in de Westerse wereld veel verzet is gerezen, ook tegen de vreedzame toepassing voor kernenergie, heeft in de wereldwijde fora nog weinig weerklank gevonden. De toon van 1968 vindt men vrijwel ongewijzigd terug in 1978. In het slotdocument van de dat jaar gehouden speciale zitting van de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties over ontwapening wordt het belang van de non-proliferatie van kernwapens uitdrukkelijk onderstreept. Maar in één adem wordt daaraan toegevoegd dat non-proliferatie-maatregelen ‘geen afbreuk mogen doen aan de volledige uitoefening van de onvervreemdbare rechten van alle staten om hun eigen programma inzake de vreedzame toepassing van kernenergie in overeenstemming met hun prioriteiten, belangen en behoeften te ontwikkelen en uit te voeren’ (4).
Uitgangspunt en eigenlijke grondslag van het NPV is derhalve de veronderstelling dat er een betrekkelijk waterdichte scheiding zou bestaan tussen de toepassing van kernenergie voor militaire doeleinden (die als afkeurenswaardig wordt gezien) en die voor vreedzame doeleinden (waarop ieder land een ‘onvervreemdbaar recht’ heeft). Men kan zich afvragen of die veronderstelling niet reeds in 1968 op drijfzand berustte, maar de nuchterheid gebiedt te erkennen dat zonder deze veronderstelling het verdrag naar alle waarschijnlijkheid niet tot stand zou zijn gekomen.

Overigens leken de problemen die eventueel zouden kunnen rijzen nu ook weer niet zo levensgroot, omdat immers de niet-kernwapenstaten die partij werden bij het verdrag zich verplichtten al hun nucleaire activiteiten onder internationale controle te plaatsen. Deze controle zou worden uitgevoerd door het te Wenen gevestigde Internationale Agentschap voor Atoomenergie (IAEA).
De moeilijkheden die in eerste instantie de grootste zorgen baarden, werden veroorzaakt door het feit dat een aantal niet onbelangrijke landen zich afzijdig hielden van het verdrag, ook al werd de overgrote meerderheid van de staten wel partij (in december 1980 waren het er 108).
Van de kernwapenstaten weigerden Frankrijk en China tot het NPV toe te treden, terwijl ook een aantal niet-kernwapenstaten, die er zelf wel nucleaire programma's op na hielden, om overigens uiteenlopende redenen besloten geen partij te worden. In dit verband moeten worden genoemd India, Pakistan, Brazilië, Argentinië, Israël, Egypte en Zuid-Afrika. Hoe diende men nu bij commerciële relaties met deze niet-partijen te handelen? Bij leveranties tussen NPV-partijen onderling deden zich geen moeilijkheden voor omdat zulk een leverantie (door het blote feit van het partij-zijn) automatisch onder IAEA-controle kwam te vallen. Maar hoe te handelen als de leverancier wel partij was, maar de afnemer niet? Moest men alleen de eis stellen dat het voorwerp van de leverantie onder IAEA-controle kwam te vallen of

moest men verder gaan en verlangen dat het ontvangende land – evenals de partijen bij het NPV – ál zijn nucleaire activiteiten aan controle onderwierp? Het laatste lijkt voor de hand liggend; op die manier immers zou het non-proliferatie-beleid maximaal gestalte krijgen. Er was echter één geduchte moeilijkheid: niet alle potentiële leveranciers van nucleair materiaal en van nucleaire technologie waren partij bij het verdrag. Als de eisen te hoog werden opgeschroefd, dan was de kans groot dat de afnemer zich zou wenden tot een leverancier die geen partij was bij het NPV, met het gevolg dat er dan wellicht helemaal niets onder internationale controle zou komen. Een te grote orthodoxie zou dus tot een contra-produktief effect kunnen leiden. En aangezien het verdrag zelf leveranciers tot niet meer verplichtte dan het object van de levering onder controle te doen plaatsen, besloot men de boog niet al te strak te spannen en van een afnemer die geen partij was bij het verdrag slechts te bedingen dat hij het te leveren materiaal onder IAEA-toezicht zou plaatsen.

Intussen leidde dit beleid wel tot eigenaardige consequenties. In de praktijk betekende het namelijk dat partijen bij het NPV, die zich reeds formeel en juridisch bindend hadden verplicht geen kernwapens aan te zullen schaffen, aan een meer stringente controle werden onderworpen dan landen die weigerden zulk een formele toezegging te doen, ja soms zelfs uitdrukkelijk de 'optie op de bom' openhielden. Deze konden immers nucleair materiaal verkrijgen zonder dat zij al hun nucleaire activiteiten onder controle hoefden te stellen, terwijl partijen bij het NPV dat wel moesten doen.
De door deze inconsequentie opgeroepen problematiek werd sterk verhevigd, toen men zich ging realiseren dat de scheidingswand tussen de vreedzame en de militaire toepassing van kernenergie minder dik was dan men wellicht in 1968 had verondersteld. Er zijn immers bepaalde technologieën (in de wandeling wel genoemd de 'gevoelige' technologieën) die de bezitter ervan in staat stellen de beschikking te krijgen over splijtstof, die zich gemakkelijk leent voor het vervaardigen van kernwapens, waarbij in de eerste plaats moet worden gedacht aan hoogverrijkt uranium en aan plutonium. Wie over de verrijkingstechnologie en over de opwerkingstechnologie beschikt, heeft in beginsel de mogelijkheid zichzelf *weapons-grade material* te verschaffen. Wanneer men dus in het kader van de in artikel 4 opgelegde samenwerking deze technologieën overdraagt, brengt men de afnemerlanden in een situatie, waarin zij het kernwapen binnen handbereik hebben. Weliswaar geldt voor de partijen bij het NPV dat zij zich formeel verplicht hebben van deze mogelijkheid geen gebruik te maken, maar het is niet bijster moeilijk om zich – als men dat zou wensen – aan de verplichtingen van het NPV te onttrekken. Artikel 10 zegt namelijk: 'Iedere partij heeft *in de uitoefening van haar nationale souvereiniteit* (cursivering van mij, *PHK*) het recht het verdrag op te zeggen, indien zij van mening is dat buitengewone gebeurtenissen die betrekking hebben op het onderwerp van dit verdrag de hoogste belangen van het land in gevaar hebben gebracht'. Weliswaar moet men drie maanden van tevoren de Veiligheidsraad en de overige verdragspartijen in een gemotiveerd schrijven op de hoogte stellen, maar dat zijn formaliteiten die voor een werkelijk vastbesloten staat geen grote moeilijkheden opwerpen. Gelden de bij de levering van gevoelige technologieën aanwezige risico's reeds voor partijen bij het NPV, hoeveel temeer zullen zij niet opgaan bij levering aan afnemers die geweigerd hebben tot het NPV toe te treden en derhalve de 'optie op de bom' opengehouden hebben? Het besef van deze risico's bracht de Tweede Kamer ertoe najaar 1975 een motie te aanvaarden, waarin zij als haar mening uitsprak dat 'in geval van leveranties van nucleaire materialen en uitrusting aan niet-kernwapen-staten, die geen partij zijn bij het NPV, de voorwaarde gesteld moet worden, dat deze staten tot het NPV toetreden' (5). Voorts werd de regering uitgenodigd met andere landen in overleg te treden teneinde te bewerk-

stelligen dat in zo breed mogelijke kring van landen deze voorwaarde zou worden gesteld.
Dit overleg leerde al betrekkelijk snel dat de wens van de Kamer niet kon worden gehonoreerd, juist omdat andere landen er uiterst bevreesd voor waren dat zich een handelscircuit in nucleaire kennis en materiaal zou gaan ontwikkelen tussen niet-partijen bij het NPV onderling, waardoor iedere garantie met betrekking tot het niet-militaire gebruik van het geleverde zou gaan ontbreken. In de betrokken periode was er echter juist een andere ontwikkeling op gang gekomen, die beoogde het ook door de Tweede Kamer gewenste doel op ietwat andere wijze te verwerkelijken. Wij doelen hiermee op het in gang gezette overleg tussen leverancier-landen in het kader van de zogenaamde Londense *Nuclear Suppliers Group*.

Dit overleg berustte op een initiatief van de Verenigde Staten, die zich zeer verontrust betoonden over een aantal belangrijke leveranties van zogenaamde gevoelige technologieën, die in 1974 in de publiciteit waren gekomen (6). Belangrijk was dat aan het overleg niet alleen landen uit Oost en West deelnamen die reeds partij waren bij het NPV, maar ook Frankrijk. Daarmee werd de kans op een non-NPV-circuit van leveranciers en afnemers aanzienlijk verkleind.
De Londense groep bereikte begin 1976 overeenstemming via een *gentlemen's agreement* over de bij het nucleaire exportbeleid in acht te nemen criteria. Tevens werd de club uitgebreid met een aantal andere leverancier-landen, waaronder Nederland. Bij schrijven van 30 maart 1976 stelde de Minister van Buitenlandse Zaken de Tweede Kamer in kennis van de door de deelnemers aan het overleg overeengekomen criteria bij het nucleaire exportbeleid (7).
De overeengekomen criteria bleven ver achter bij wat in de motie-Ter Beek was verlangd. Slechts werd de eis gesteld dat geleverd materiaal zou moeten worden onderworpen aan controle door het IAEA (voor partijen bij het NPV reeds een rechtsplicht) en voorts werd gesteld dat terughoudendheid zou worden betracht bij de uitvoer van gevoelige technologieën, uitrusting en materialen. Wat onder 'terughoudendheid' in concreto moest worden verstaan, was niet duidelijk en werd dus overgelaten aan de individuele deelnemer-staten.
Ook al ging het overeengekomene niet erg ver (8), het was voldoende om de in de kring van ontwikkelingslanden reeds bestaande gevoelens van ontstemming te doen toenemen. Van die ontstemming was reeds gebleken op de in het voorafgaande jaar (1975) gehouden eerste toetsingsconferentie van het NPV (9). Een aantal landen uit de Derde Wereld, die zich indertijd zeer beijverd hadden voor de totstandkoming van het NPV, o.a. Mexico, Joegoslavië, Nigeria, hadden zich tijdens deze conferentie zeer kritisch uitgelaten over de wijze waarop het NPV had gefunctioneerd. Die kritiek gold in de voornaamste plaats de manier waarop de kernwapenstaten zich van hun verplichtingen onder artikel 6 (het te goeder trouw onderhandelen over nucleaire ontwapening) hadden gekweten. Van nucleaire ontwapening was immers geen sprake; in weerwil van het eerste SALT-akkoord ging de nucleaire wapenwedloop door. Maar daarnaast was er ook ontstemming te beluisteren over de wijze waarop de nucleair-ontwikkelde landen hun verplichting uit artikel 4 tot het overdragen van kennis en technologie hadden nageleefd (10).
Het bekend worden van de oprichting van de Londense *Nuclear Suppliers Group* en de daar gemaakte beleidsafspraken deed de ontstemming omslaan in een diep wantrouwen. Aan het Londense overleg lag het bij de deelnemers geleidelijk gegroeide besef ten grondslag, dat de scheidingswand tussen vreedzame en militaire toepassing van kernenergie minder stevig was dan in het verleden was verondersteld, en ook de op dat inzicht gestoelde bezorgdheid dat het non-proliferatie-regime dreigde te worden ontkracht. Deze motivering werd door de landen van de Derde Wereld niet onderkend en voorzover dat wel het geval was politiek afgekeurd.

In de eerste plaats koesterden zij de verdenking dat de nucleair-ontwikkelde landen, na eerst de Derde Wereld te hebben afgehouden van de militaire toepassing van kernenergie via het NPV, thans pogingen in het werk stelden hen ook de vreedzame toepassing ervan te onthouden; dat alles in strijd met de uitdrukkelijk door die ontwikkelde landen aanvaarde verplichting van artikel 4 van het NPV.
En zelfs wanneer de oprechte bezorgdheid van de leverancier-landen wel werd onderkend, dan werd in ieder geval een situatie onaanvaardbaar geacht die de ontwikkelde landen in het bezit van technologieën liet, die de ontwikkelingslanden zouden moeten ontberen. De leverancier-landen maakten immers geen aanstalten de eigen verrijkings- en opwerkingsinstallaties te ontmantelen of ze in te brengen in een multilateraal samenwerkingsverband onder internationale beheersvorm, waaraan ook de Derde-Wereldlanden zouden kunnen participeren. Daarmee zou de technologische voorsprong van de ontwikkelde landen eens en voor altijd worden vastgelegd. Tenslotte was er het op het eerste gezicht formeel-juridische bezwaar dat op deze manier eenzijdig door de ontwikkelde landen materiële wijzigingen aangebracht werden in het non-proliferatieregime. Maar aan dit bezwaar lag ten grondslag de ergernis over het 'bevoogdend' optreden van de ontwikkelde landen, die eenzijdig wel eens zouden uitmaken wat goed was voor de wereld en vaststelden dat een aantal zaken niet vertrouwd waren in de handen van de Derde Wereld, terwijl ze kennelijk wel vertrouwd waren in handen van het ontwikkelde deel van de wereld. Als gevolg van dit alles werd het verkrijgen van de volledige splijtstof-cyclus, met inbegrip van de als gevoelig gekwalificeerde technologieën, nog meer een prestigezaak voor de ontwikkelingslanden dan voorheen. Het werd min of meer symbool voor de uitoefening van hun economisch zelfbeschikkingsrecht.
Typerend in dit verband is bijvoorbeeld dat de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties in 1977 een resolutie aannam, waarin werd bevestigd dat 'all States have the right, *in accordance with the principle of sovereign equality,* to develop their programmes for the peaceful use of nuclear technology for economic and social development *in conformity with their priorities, interests and needs,* and should have, *without discrimination,* access to, and be free to acquire, technology and materials for the peaceful use of nuclear energy under effective and non-discriminatory safeguards against the proliferation of nuclear weapons' (11).

De reeds bestaande spanningen waren in 1977 nog sterk toegenomen door een ambitieus programma dat de nieuwe regering van de Amerikaanse president Carter had ontvouwd. Tijdens zijn verkiezingscampagne had Carter zich uitermate bezorgd getoond over de proliferatierisico's als gevolg van de 'plutoniumeconomie'. Deze bezorgdheid, die ook reeds was verwoord in de nadagen van de regering-Ford, resulteerde in een klemmende oproep aan de landen, die reeds beschikten over gevoelige technologiën, deze gedurende een bepaalde bezinningsperiode niet ter beschikking te stellen aan andere landen, zelf bij de toepassing ervan de grootste terughoudendheid te betrachten en zo mogelijk zelfs een moratorium in te stellen met betrekking tot de toepassing van opwerkings- en snelle kweektechnologie, daar deze immers vanuit non-proliferatie-oogpunt het gevaarlijkst waren vanwege het feit dat daarbij plutonium vrijkomt (12). Tijdens deze bezinningsperiode zou een breed internationaal overleg moeten worden gevoerd, waarbij onder meer zou dienen te worden onderzocht of er geen 'inherent veilige splijtstofcyclus' mogelijk was, d.w.z. een splijtstof-cyclus waarbij geen materiaal (zoals plutonium) vrijkomt dat zich leent voor onmiddellijke militaire toepassing. Gedacht werd daarbij aan een uranium-thoriumcyclus. Dit overleg dat in oktober 1977 startte, luisterde naar de naam INFCE, *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation* (13).
De ideeën van de nieuwe Amerikaanse regering vielen bepaald niet in een vruchtbare bodem. Werd het binnen de Derde Wereld reeds bestaande wantrouwen nog

versterkt, aangezien men er een nieuwe poging in zag de ontwikkelingslanden de nucleaire technologie te onthouden om zodoende de afhankelijkheidsrelatie van deze landen met de ontwikkelde wereld te continueren, ook de nucleair-ontwikkelde landen betoonden zich (met uitzondering van enkele, waaronder Nederland) uiterst gereserveerd. Een aantal hunner – waaronder met name genoemd mogen worden Frankrijk, Japan en de Duitse Bondsrepubliek – hadden nog uiterst traumatische herinneringen aan de olie-crisis van 1973. Zij zagen in een snelle ontwikkeling van de kernenergie – en met name ook in de commerciële introductie van snelle kweekreactoren – een middel om steeds minder afhankelijk te worden van de producenten van fossiele energiedragers. Zij voelden er niets voor om gedurende een periode dat INFCE zou worden gehouden (geraamd op plusminus twee jaar) pas op de plaats te maken. Toen INFCE dan ook bijeenkwam lagen er geen toezeggingen op tafel om gedurende de overlegperiode de toepassing van opwerkings- en snelle kweektechnologie te bevriezen of in te tomen (14).
Begon INFCE dus onder een niet bijster gelukkig gesternte, het heeft wel in die zin ontspannend gewerkt dat er voor het eerst een breed overlegkader was, waaraan zowel leveranciers als afnemers deelnamen. Het vooral voor de Derde Wereld zo irriterende besloten karakter van het 'Londense kartel' was daarmee doorbroken.

INFCE, dat in februari 1980 werd afgesloten, heeft overigens geen horizonten verlegd ten aanzien van een inherent veilige splijtstofcyclus, evenmin als het de grondslagen heeft gelegd voor een vernieuwd en verjongd non-proliferatiebeleid. In dat opzicht zijn de aanvankelijk hoge verwachtingen, die aan Amerikaanse zijde werden gekoesterd, niet uitgekomen. Op een aantal punten kon nuttige vooruitgang worden geboekt, zo onder meer op de sterk door Nederland bevorderde instelling van een plutonium-opslagsysteem (15). En eveneens kan als een pluspunt worden aangemerkt dat het begrip over en weer voor elkanders preoccupaties toenam (16), hetgeen ook tot uitdrukking komt in de laatste zin van het slotcommuniqué, waarin de deelnemers verklaren dat zij 'het klimaat van wederzijds begrip en samenwerking op het gebied van de kernenergie, dat één van de belangrijkste verworvenheden van INFCE is' willen bewaren. Maar Amerika slaagde er niet in de wereld ervan te overtuigen af te zien van de plutoniumeconomie en geleidelijk aan 'erkende' de regering-Carter de behoefte van bepaalde landen aan opwerkingsfabrieken en snelle kweekreactoren, installaties die in 1977 nog als het grootste gevaar waren afgeschilderd (17).
Evenmin kon overeenstemming worden bereikt over een ander belangrijk punt, dat ook reeds binnen de Londense *Suppliers Group* tot verdeeldheid aanleiding had gegeven: de vraag of bij leverantie van nucleair materiaal aan niet-partijen bij het NPV *full scope safeguards* moesten worden bedongen, dat wil zeggen: of verlangd moest worden dat de afnemer alle nucleaire activiteiten onder IAEA-controle zou stellen, waarmee partijen en niet-partijen bij het NPV op één lijn zouden worden gebracht en aan hetzelfde controle-régime zouden worden onderworpen. De Verenigde Staten, gesteund door landen als Canada (dat deze eis reeds stelt), Zweden en Nederland waren hiervan voorstander, terwijl met name de Bondsrepubliek Duitsland en Frankrijk er (nog) niet van wilden weten. De laatste landen stelden dat in de praktijk *full scope safeguards* reeds in verregaande mate zijn verwezenlijkt, maar dat het formeel aan de orde stellen ervan de Noord-Zuid-tegenstelling alleen maar zou verscherpen; dit alles belette overigens de Bondsrepubliek niet een contract met Argentinië in de wacht te slepen, dat anders (de Canadese inschrijving was aanzienlijk goedkoper) aan Canada zou zijn gegund; Bonn insisteerde niet, zoals Canada, op *full scope safeguards* (18).
Het toegenomen begrip, waarvan het slotdocument van INFCE gewaagt, was echter niet voldoende om de Tweede Toetsingsconferentie van het NPV (11 augustus – 7 september 1980) tot een succes te maken. Na vier weken moeizaam vergaderen

werd de conferentie afgesloten zonder dat men tot overeenstemming had kunnen komen over een slotverklaring. Weliswaar bestond er nog steeds algemene instemming met de doelstellingen van het verdrag (19), maar de reeds op de Eerste Toetsingsconferentie gebleken gevoelens van onbehagen over de wijze waarop een aantal verdragspartijen zich van hun verplichtingen kweten, waren aanzienlijk sterker geworden. Dat gold met name de wijze waarop de kernwapenstaten (lees: de grootmachten) hun plichten onder artikel 6 waren nagekomen, of liever, niet waren nagekomen. Het feit dat SALT II niet van kracht was geworden en dat de SALT III-onderhandelingen nog niet van start waren gegaan, leverde met name van de kant van de Derde-Wereldlanden, maar zeker niet alléén van hun kant, felle kritiek op. Een aantal van deze zijde geformuleerde eisen, zoals een moratorium op militaire kernproeven en een toezegging SALT II na te leven ook zonder dat het in werking was getreden, waren voor één of voor beide supermachten onaanvaardbaar. Dit bleek het grootste struikelblok te zijn voor het tot stand komen van een slotverklaring.
Maar ook de wijze waarop artikel 4 werd nageleefd gaf aanleiding tot fikse controverses. Niet alleen bestond er ongenoegen over de geringe omvang van de door de ontwikkelde landen gegeven technische hulp, ook de bij deze landen bestaande neiging eenzijdig verdergaande export-voorwaarden vast te stellen dan in het multilaterale overleg was overeengekomen, leidde tot scherpe kritiek. Zo bleek ook ter Toetsingsconferentie geen overeenstemming mogelijk over het invoeren van de *full scope safeguards*-voorwaarde.
Wellicht zou het nog mogelijk zijn geweest een slotverklaring te formuleren over de tenuitvoerlegging van artikel 4, maar de meningsverschillen over artikel 6 waren uiteindelijk beslissend. De conferentie eindigde zonder resultaat (20). Tekenend voor de algemene malaise-stemming is dat men na afloop toch nog opgeluchte geluiden kon vernemen: het had immers nog erger gekund. Het NPV zelf en daarmee de aanvaarding van het non-proliferatiebeleid was tenminste nog intact.

Dat mag allemaal waar zijn en een positieve waardering van het feit dat het NPV de slag overleefd heeft moge op zijn plaats zijn, het lijkt toch hoog tijd voor een bezinning op de vraag hoe dat non-proliferatiebeleid wat meer concrete inhoud kan worden gegeven.
In de allereerste plaats lijkt het goed om vast te stellen dat het non-proliferatiebeleid nog steeds steun verdient. In een wereld waarin de spanningen de laatste jaren aanzienlijk zijn toegenomen is het vooruitzicht van een groot aantal staten dat over kernwapens beschikt weinig aanlokkelijk. Het NPV heeft er in de ruim tien jaar van zijn bestaan in belangrijke mate toe bijdragen dat het niet als de gewoonste zaak van de wereld wordt beschouwd dat een land over kernwapens mag beschikken. De zogenaamde vreedzame kernexplosie in India in 1974 (die in feite niets anders was dan het tot ontploffing brengen van een atoombom voor beweerdelijk vreedzame doeleinden) doorbrak de magische cirkel van de 'Grote Vijf', maar leidde desondanks niet tot navolging. India zelf putte zich uit in verzekeringen dat het – hoewel geen partij bij het NPV en dus juridisch niet gebonden – niet voornemens was kernwapens te verwerven. Een aantal landen, waaraan het bezit van althans enige kernwapens wordt toegeschreven (Israël, Zuid-Afrika) hebben dit bezit nooit publiekelijk willen toegeven. Andere landen, die aspiraties in die richting worden toegedacht (Pakistan, Irak en Lybië – de laatste twee zijn partij bij het NPV) ontkennen dat zij naar het bezit van de bom zouden streven. Het gaat er thans niet om, vast te stellen welke waarde aan deze officiële verklaringen moet worden toegekend; wat er duidelijk uit blijkt is dat – mede dank zij het NPV – voor niet-kernwapenstaten het bezit van kernwapens als iets 'onoirbaars' wordt beschouwd.
Hoe lang dat nog zo zal blijven is overigens de vraag. Uit het verloop van de Tweede Toetsingsconferentie is wel gebleken dat het uitblijven van reële wapenverminderingsovereenkomsten tussen de kernwapenstaten een ernstige bedreiging

voor het NPV kan gaan betekenen. Aannemende dat deze landen grote waarde hechten aan het non-proliferatiestreven – en er is geen enkele reden daaraan te twijfelen – kan worden vastgesteld dat zij het in belangrijke mate zelf in de hand hebben de ter conferentie gebleken dreiging af te wenden. Ik wil daarmee geenszins suggereren dat het bereiken van wapenverminderingsafspraken een simpele zaak zou zijn; maar de kernwapenstaten dienen zich wel bij voortduring bewust te zijn van de mogelijke consequenties van het niet slagen van hun onderhandelingen voor de algemene – en daarmee ook voor hun eigen – veiligheidssituatie.
Daarnaast blijft de toepassing van artikel 4 zorg baren. Of men dat nu verstandig vindt of niet, een meerderheid van de landen in de wereld is duidelijk niet bereid om op korte termijn af te zien van de toepassing van kernenergie voor vreedzame doeleinden. Vele landen koesteren hoge verwachtingen van kernenergie als middel tot het oplossen van hun economische problemen en in ieder geval wensen zij voor zichzelf uit te maken of de kernenergie hen zal baten of niet. Daartoe verlangen zij de hun toegezegde overdracht van technologie en materialen. Uit de ervaringen van de afgelopen tien jaar moet de les worden getrokken dat goedbedoelde eenzijdige maatregelen van de zijde van de exporteurs het internationale klimaat ernstig vertroebelen. Anderzijds moet worden erkend dat het bestaande waarborgensysteem, zeker als het om gevoelige technologieën gaat, als onvoldoende wordt ervaren. Daarmee wordt niets ten nadele gezegd van de wijze waarop dit waarborgensysteem in de praktijk functioneert en van de manier waarop de inspecteurs hun taak uitoefenen. Maar dat waarborgen-systeem is gebaseerd op een onvoldoende onderkenning van de verwevenheid van de mogelijkheden van militaire en vreedzame toepassing van kernenergie. Ware het anders, dan zouden de leverancier-staten niet tot hun overleg en onderlinge beleidsafstemming zijn gekomen.
Evenzo lijkt het onmogelijk om terug te keren naar 'af' en opnieuw te starten met een 'inherent veilige splijtstofcyclus'. Nog afgezien van de vraag of deze realiseerbaar is, de reeds gedane investeringen blijken te omvangrijk te zijn, dan dat men met een nieuwe start zou willen beginnen. Het verloop van INFCE is daarvan een sprekend bewijs en voorts heeft de oorspronkelijke initiator van dit idee, de Verenigde Staten, onder de regering-Reagan de bordjes volledig verhangen.

Welke wegen staan dan nog wel open? Gegeven de politieke realiteiten zou aan de volgende mogelijkheden – en bij voorkeur aan een combinatie daarvan – kunnen worden gedacht:
a. *Verzekerde uranium-voorziening.* Eén van de belangrijke motieven voor het verwerven van de gehele splijtstofcyclus en daarmee van de gevoelige technologieën lijkt de wens te zijn, zich onafhankelijk te maken van de leverancier van verrijkingsarbeid. Die leverancier kan immers allerlei voorwaarden, ook van bijkomende aard, stellen. Of hij kan de levering van verrijkt uranium weigeren, bijvoorbeeld vanwege het feit dat het régime van de cliënt-staat hem niet bevalt of omdat de rechten van de mens aldaar niet worden gerespecteerd. Dat kunnen hoogst eerbiedwaardige argumenten zijn, maar aan het non-proliferatiebeleid als zodanig zijn zij vreemd. De regering-Carter heeft indertijd reeds gesuggereerd een soort splijtstofbank in het leven te roepen, waaraan de landen die over verrijkingsinstallaties beschikken verrijkt uranium zouden moeten leveren. De afnemers zouden dan bij deze bank hun bestellingen kunnen plaatsen, die zouden moeten worden gehonoreerd in al die gevallen waarin is vastgesteld dat de bestemming ervan vreedzaam is en een bevredigende controle-regeling is overeengekomen. Deze en andere zaken zijn aan de orde binnen het in IAEA-verband in het leven geroepen *Committee on Assurance of Supply.*
b. *Plutonium-opslagrégime.* Als gevolg van de vreedzame toepassing van kernenergie kunnen landen de beschikking krijgen over *weapons-grade material,* splijtstof die zich voor onmiddellijke militaire toepassing leent. Plutonium is hiervan het

bekendste voorbeeld. Het is begrijpelijk dat dit bezit van *weapons-grade material* door individuele landen als één van de ernstigste bedreigingen van het non-proliferatierégime wordt beschouwd. Ook al is dit materiaal aan IAEA-inspectie onderworpen, eventuele onttrekking aan de onder controle gestelde voorraden voor militaire doeleinden kan pas achteraf worden geconstateerd. Veel minder risico's doen zich voor indien dit materiaal onder internationaal beheer zou worden geplaatst. Wanneer het betrokken land, dat eigenaar van het plutonium blijft, bepaalde hoeveelheden ervan nodig heeft, dan zal de beherende instantie deze aan het land teruggeven, indien genoegzaam is aangetoond dat de aanwending ervan zal geschieden voor vreedzame doeleinden. Ook deze zaak is in IAEA-verband in bespreking en aangenomen mag worden dat deze besprekingen op niet al te lange termijn tot concreet resultaat zullen leiden.

c. *Multilateralisering van splijtstofcentra.* Indien de toepassing van gevoelige technologieën niet door één enkel land geschiedt maar door een aantal landen gemeenschappelijk, dan zullen de kansen op misbruik aanzienlijk afnemen. Het is dan ook begrijpelijk dat al in een vroeg stadium gepleit is voor internationalisering van de toepassing van kernenergie voor vreedzame doeleinden. En op bescheiden schaal heeft zich ook al een dergelijke multilateralisering voorgedaan; Urenco is er een voorbeeld van. Teneinde een werkelijke sfeer van vertrouwen te scheppen, zou multilateralisering echter op een veel grotere schaal moeten worden opgezet. Maar in hoeverre dit tot de reële mogelijkheden van de nabije toekomst behoort, valt moeilijk te zeggen. De moeilijkheden daarbij moeten in ieder geval niet worden onderschat. Gevestigde belangen spelen hier een zeer belangrijke en belemmerende rol, om nog maar te zwijgen van politieke problemen. Gezien de Indiaas-Pakistaanse tegenstellingen lijkt bijvoorbeeld een regionaal splijtstofcentrum in Zuid-Azië weinig waarschijnlijk, hoezeer dat ook aan het wegnemen van spanningen zou kunnen bijdragen. Juist daarom is het de vraag of regionalisering wel de beste wijze van multilateralisering is (21).

Door een combinatie van deze benaderingen zou zonder enige twijfel een meer 'proliferatiebestendig' régime verkregen kunnen worden. Eén ding lijkt echter duidelijk: zulk een régime zal niet-discriminerend moeten zijn; anders zal het er naar alle waarschijnlijkheid niet van komen. Dat wil zeggen dat de nucleair ontwikkelde landen zich er in dezelfde mate aan zullen moeten onderwerpen als de ontwikkelingslanden. Het is twijfelachtig of de ontwikkelde landen daartoe bereid zullen zijn (zij verliezen immers een niet onbelangrijk stuk van hun huidige vrijheid van handelen), doch het moet – na alles wat er in de jaren zeventig is gebeurd – ondenkbaar worden geacht dat de landen van de Derde Wereld zouden instemmen met een régime dat zij opnieuw als discriminerend zouden ervaren. De kansen op een versterking van het non-proliferatierégime worden dus in belangrijke mate bepaald door de bereidheid van de ontwikkelde landen hun bestaande vrijheid van handelen in te perken, bijvoorbeeld door het hun ter beschikking staande plutonium eveneens onder een internationaal opslagrégime te plaatsen. Indien zij die bereidheid opbrengen, dan zou het proces van afkalving, waaraan het non-proliferatierégime onderhevig is, wellicht tot staan kunnen worden gebracht en zou het régime zelfs worden versterkt. Zoals bij de toepassing van artikel 6 het succes van het non-proliferatiestreven kan worden bepaald door de kernwapenstaten, kan het welslagen ervan bij de toepassing van artikel 4 aanmerkelijk worden begunstigd door de ontwikkelde landen.

Men dient zich overigens wel te realiseren dat het niet verspreiden van kernwapens allereerst een politiek probleem is en dat de kansen op het welslagen van een daarop gericht beleid allereerst door politieke factoren en door het politieke klimaat worden bepaald. Door de hier opgesomde benaderingswijzen kan echter dat politieke klimaat wel in positieve zin worden beïnvloed.

Noot. Het Israëlische bombardement van de Osirak-reactor in Irak in het voorjaar van 1981 heeft algemeen de aandacht gevestigd op een ander risico, verbonden aan de vreedzame toepassing van kernenergie. Een nucleaire installatie kan in een gewapend conflict worden getroffen (al dan niet met opzet) en de gevolgen daarvan kunnen zeer ernstig zijn. Deze problematiek houdt echter niet direct verband met het proliferatievraagstuk. Het verbieden van bombardementen op kernreactoren en andere nucleaire installaties wordt besproken in de context van de onderhandelingen over een verdrag tot uitbanning van radiologische wapens, terwijl ook de opvatting wordt verkondigd dat dergelijke bombardementen reeds verboden zijn door artikel 56 van het eerste Protocol van 1977 tot aanvulling van de Geneefse Rode-Kruis-verdragen van 1949. Zie voor een bespreking van de Osirak-kwestie een recentelijk bij het Nederlands Instituut voor Vredesvraagstukken verschenen publikatie van Drs. M. van Leeuwen, getiteld *Irak: Kernmogendheid?* (augustus 1981).

Referenties

(1) Op dat moment waren dat de Verenigde Staten, de Sovjet-Unie, het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk.

(2) Resolutie 1665 (XVI).

(3) Zie de preambulaire paragraaf 6 van het Non-Proliferatie Verdrag.

(4) *Final Document*, paragrafen 36 en 38. Het nogal barokke taalgebruik komt voor rekening van de Algemene Vergadering.

(5) Onmiddellijke aanleiding tot deze motie-Ter Beek was de voorgenomen levering door Nederlandse bedrijven van reactorvaten aan Zuid-Afrika, een land dat geen partij is bij het NPV. De levering heeft overigens niet plaatsgevonden, doordat de afsluiting van het contract geen doorgang vond. Dit werd aan een Franse onderneming gegund.

(6) Genoemd worden hier een monstercontract tussen de Bondsrepubliek Duitsland en Brazilië, waarbij een aantal kernreactoren, een verrijkings- en een opwerkingsfabriek zouden worden geleverd en de voorgenomen levering van een opwerkingsfabriek aan Pakistan door Frankrijk. De bedoeling van de Amerikanen was te komen tot een gemeenschappelijk beleid tussen de leveranciers van nucleaire kennis en materiaal, teneinde te voorkomen dat er zich een concurrentiestrijd zou gaan ontwikkelen tussen potentiële leveranciers, die ten koste van de betrouwbaarheid van de te verlangen garanties zou gaan. Tevens wilden de Amerikanen de levering van gevoelige technologieën zoveel mogelijk aan banden leggen.

(7) De tekst van deze brief is te vinden in *uitgave 118* van het Ministerie van Buitenlandse Zaken, bijlage 10.

(8) Een bijstelling vond plaats in 1977, waarna de club niet meer bijeen kwam.

(9) Ingevolge artikel 8, lid 3 van het NPV moest deze conferentie vijf jaar na de inwerkingtreding van het verdrag worden gehouden 'teneinde de werking van het verdrag aan een onderzoek te onderwerpen'.

(10) Toetsingsconferentie van de Partijen bij het Verdrag inzake de Niet-Verspreiding van Kernwapens, Ministerie van Buitenlandse Zaken *114*, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage 1976.

(11) Resolutie 32/87 F, 12 december 1977.

(12) Voor een meer uitvoerige uiteenzetting van het Carterprogramma, zie het artikel van de hand van de architect van dit programma, Joseph S. Nye, Non Prolife-

ration: A Long Strategy, in *Foreign Affairs 56* (1977/78), blz. 601-623. Men dient zich overigens wel te realiseren dat dit artikel werd geschreven toen de oorspronkelijke plannen al enigszins waren bijgesteld als gevolg van het verzet dat ertegen gerezen was.

(13) Nye, t.a.p., blz. 615: 'The idea behind INFCE is to have both the supplier countries and de consumer countries come together to study the technical and institutional problems of organizing the nuclear fuel cycle in ways which provide energy without providing weaponry.'

(14) Zie voor een kritische beschouwing van het INFCE-concept Pierre Lelouche, International Nuclear Politics, in *Foreign Affairs 58* (1979/1980), blz. 336-350.

(15) Deze Nederlandse preoccupatie hing samen met de levering van verrijkingsarbeid door Urenco aan Brazilië, een affaire die in de Nederlandse binnenlandse politiek tot heftige commoties leidde. Zie voor de problemen verbonden aan een internationaal plutonium-opslagsysteem Frederick F. McGoldrick, International Plutonium System, in *Nuclear Non-Proliferation and Safeguards, a Conference Report*, Atlantic Institute for International Affairs, 1980.

(16) Zie Philip J. Farley, The International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, in *Nuclear Non-Proliferation and Safeguards, a Conference Report,* Atlantic Institute for International Affairs, 1980.

(17) Zie voor een om deze reden zeer negatieve beoordeling van INFCE Amory B. Lovins, L. Hunter Lovins en Leonard Ross, Nuclear Power and Nuclear Bombs, in *Foreign Affairs 58* (1980), blz. 1137.

(18) Zie voor deze en andere tegenstellingen tussen de nucleaire exporteurs Pierre Lelouche, Breaking the Rules Without Quite Stopping the Bomb; European Views, in *International Organization 35* (1981), blz. 39; voor een Amerikaanse versie zie in hetzelfde - geheel aan de proliferatieproblematiek gewijde - nummer Joseph S. Nye, Maintaining a Non-proliferation Regime, blz. 15.

(19) Zie o.a. Charles van Doren, the NPT: Status and Prospects, in *Non-Proliferation and Safeguards, a Conference Report,* Atlantic Institute for International Affairs, 1980.

(20) Zie voor een summier verslag van de conferentie een notitie van de Minister van Buitenlandse Zaken aan de Tweede Kamer. Tweede Kamer, zitting 1980/81, 16.400 Hoofdstuk V, nr. 13.

(21) Zie ook het uiterst interessante artikel van Lawrence Scheinman, Multinational Alternatives and Nuclear Non-Proliferation, in *International Organization 35* (1981), blz. 77.

30. MAATSCHAPPELIJKE AANVAARDING

E. Abma

Dit laatste hoofdstuk gaat in op de argumenten, die veel mensen tot een aarzelende of afwijzende houding tegenover kernenergie hebben gebracht. De maatschappelijke aanvaarding, die in de jaren vijftig groot was, is met het wegvallen van de dringende noodzaak - of de als zodanig gevoelde noodzaak - klein geworden. Het aantal mensen dat meent dat kernenergie onmisbaar zal zijn is teruggelopen en is nu ongeveer gelijk aan het aantal dat meent dat kernenergie gemist zal kunnen worden. Overigens heeft men door de jaren heen steeds het besef gehad dat kernenergie risico's met zich meebrengt en zich steeds in meerderheid gereserveerd opgesteld. De argumenten van het protest tegen de kernenergie worden weergegeven en de protestbeweging en haar strijdmethoden worden geschetst. Waar het aanvankelijk ging om milieubeschermers, is de beweging in de jaren zeventig gegroeid tot een coalitie van een groot aantal verschillende groeperingen. Gemakkelijk ontstaat het beeld van emotionele jongeren die kernenergie verwerpen in samenhang met hun meer algemene maatschappijkritiek. Dit beeld is echter misleidend, omdat het voorbijgaat aan de argumenten die tegen kernenergie worden aangevoerd en aan de heterogene samenstelling van de anti-kernenergiebeweging.

Van aanvaarding naar protest

Het jaar 1955 kan gezien worden als het begin van een Nederlands kernenergiebeleid (1). Nederland was bezig zich spectaculair te herstellen van de schade, door de oorlog aangericht. De industrie, die moest bijdragen aan de welvaart en werkgelegenheid moest verschaffen aan een snel groeiende bevolking, werd sterk gestimuleerd. Een goede energievoorziening was voor de bloei van de industrie en de groei van de welvaart onontbeerlijk. Hoge prijzen van de grondstoffen voor de energieproduktie, in het bijzonder van de olie, en sombere verwachtingen ten aanzien van de oliereserves wekten dan ook bezorgdheid bij regering en bedrijfsleven. Groot waren echter de verwachtingen, toen met hulp van de Verenigde Staten het niet-militair gebruik van atoomenergie uitkomst leek te bieden. Niet alle problemen van de toepassing van atoomenergie waren opgelost, maar in die dagen had men nog een bijna onbeperkt vertrouwen in wetenschap en techniek.

Men dient deze situatie van 's lands economie in de tweede helft van de jaren vijftig voor ogen te houden om de gretige aanvaarding van kernenergie als oplossing van het energieprobleem goed te begrijpen. Toen in 1957 de Nota inzake de Kernenergie verscheen, werd een snelle realisering van de toepassing ervan verwacht. De eerste kerncentrale zou al in 1962 in gebruik zijn en tegen 1975 zou ruim ééndérde van het geïnstalleerde elektrisch vermogen gebaseerd zijn op kernenergie (2). De regering ontmoette geen verzet tegen haar kernenergiebeleid, hoogstens kritiek op een te weinig voortvarende aanpak (3). Dat kernenergie ook in haar vreedzame toepassingen gevaarlijk kon zijn besefte men, maar er heerste nog groot vertrouwen in de menselijke creativiteit en vindingrijkheid. Medisch-biologisch onderzoek diende gestimuleerd te worden om tot een optimale beveiliging tegen ioniserende straling te komen. Het radioactieve afval baarde nog geen zorgen; een oplossing voor dat probleem zou ongetwijfeld gevonden worden. Daarentegen was men wel bevreesd dat Nederland in de ontwikkeling van de kernenergie bij andere

landen zou achterlopen en onze industrie de boot zou missen.
De jaren zestig hebben niet die groei laten zien die was verwacht. Het bouwen van commercieel werkende kerncentrales bleek meer technische problemen op te leveren dan was voorzien. Bovendien bleken de olievoorraden veel groter te zijn en daalde de prijs van ruwe olie, waardoor de urgentie van toepassing van kernenergie verminderde. De eerste Nederlandse kerncentrale werd pas in 1969 officieel in gebruik gesteld, maar inmiddels was Nederland door de grote aardgasvondsten een goedkope energiedrager rijker geworden. Toch rekende men nog altijd op een toekomst met kernenergie en meende men het aardgas maar beter snel te kunnen opmaken.
Het jaar 1970 betekende niet alleen het begin van een nieuw decennium, maar ook van een veranderende instelling tegenover kernenergie. De door de Provinciale Zeeuwse Energiemaatschappij (PZEM) aangevraagde vergunning voor de bouw van een kerncentrale te Borsele (4) luidde het tijdperk in van bezwaarschriften en beroepschriften tegen elke aan een vergunning gebonden activiteit op het gebied van de kernenergie (5).
Een tweede vorm van verzet tegen kernenergie was de nota Kernenergie van de Werkgroep Kernenergie uit de Raad voor de Milieudefensie, een reactie op de Nota inzake het Kernenergiebeleid van maart 1972 (6). Op een hoorzitting van de vaste commissie van de Tweede Kamer voor de kernenergie werden de nota en de daarin vervatte bezwaren tegen kernenergie nader toegelicht.
De groep moet bij sommige Kamerleden een willig oor hebben gehad, want eerder in 1972 waren enkele Kamerleden lastige vragen gaan stellen over haarscheurtjes, veiligheidsvoorzieningen, enz. Ook bij de bespreking van de Nota van de Minister bleek dat niet meer zo licht werd gedacht over stralingsrisico's, de opslag van radioactief afval en andere kwesties.
Onder de bevolking bestond in het begin van de jaren zeventig nog weinig zorg over de kernenergie. Daartoe zullen de massamedia zeker hebben bijgedragen, want al werd wel van een enkel incident zoals de haarscheurtjes melding gemaakt, er werd ook optimistisch gerapporteerd over plannen voor een derde kerncentrale. Verandering hierin kwam pas, toen in 1973 de overheid de deelname aan de kweekreactor te Kalkar ging financieren uit de opbrengst van een toeslag van 3% op de elektriciteitsrekening (7). Het verzet hiertegen, vooral uitgegaan van de milieubeweging, bereikte de publiciteit en leidde tot het ontstaan van een specifiek tegen de kernenergie gerichte organisatie, de Landelijke Stroomgroep Stop Kalkar. In vele plaatsen ontstonden stroomgroepen die in samenwerking met milieugroepen opwekten tot weigering de Kalkarheffing te betalen.
Uit deze eerste acties is in de jaren daarna een steeds breder wordende anti-kernenergiebeweging (AKB) gegroeid (8). Met bescheiden middelen, maar met een veelheid van actievormen is de AKB erin geslaagd het vraagstuk van de kernenergie onder veler aandacht te brengen en bij zeer velen de overtuiging te doen postvatten dat aan toepassing van kernenergie grote risico's kleven.
Hoe de bevolking op deze ontwikkelingen heeft gereageerd kan enigermate worden afgeleid uit een opinie-onderzoek van de Nederlandse Stichting voor Statistiek die in een viertal jaren met een gelijke vraagstelling de mening van de bevolking van achttien jaar en ouder over kerncentrales heeft gepeild. Uit de tabel blijkt dat het percentage burgers dat kerncentrales onmisbaar acht, daalde van 56 in 1973 tot 38 kort na het ongeval in Harrisburg, om in 1980 weer te stijgen naar 43. In toenemende mate acht men in de genoemde periode de risico's van kerncentrales vrij groot tot echt groot en vindt men de techniek nog niet geavanceerd genoeg. De grootste verandering zien we in de persoonlijke gevoelens van ongerustheid, oplopend van 36% tot 66% kort na 'Harrisburg'. Daarna daalde dit percentage weer iets, maar in oktober 1980 voelde nog altijd 61% van de bevolking zich ongerust.

Tabel I. Mening over enkele aspecten van kerncentrales in 1973, 1975, 1979 en 1980.

	1973	1975	1979	1980
Kernenergie-centrales				
zullen onmisbaar zijn	56	44	38	43
zullen niet onmisbaar zijn	16	35	38	38
weet niet	28	21	24	19
totaal	100%	100%	100%	100%
Risico omwonenden				
geen enkel	15	6	3	4
te verwaarlozen	28	24	17	20
vrij groot	27	44	47	46
echt groot	8	11	23	20
weet niet	22	15	10	10
totaal	100%	100%	100%	100%
Geavanceerdheid van techniek				
al ver genoeg	27	20	16	17
juist niet ver genoeg	42	57	64	63
weet niet	31	23	20	20
totaal	100%	100%	100%	100%
Persoonlijke gevoelens				
gerust	46	34	22	28
ongerust	36	52	66	61
weet niet	18	14	12	11
totaal	100%	100%	100%	100%
aantal ondervraagden	1.023	1.033	1.018	924

Bron: persbericht van de NV v/h Nederlandse Stichting voor Statistiek, oktober 1980.

Het protest

In voorgaande hoofdstukken is duidelijk geworden tegen welke aspecten van de kernenergie het protest zich richt. Hier worden ze, zij het in andere volgorde, kort herhaald. Allereerst is er de beduchtheid voor de gezondheid, veroorzaakt door de toevoeging van ioniserende straling boven de hoeveelheid waaraan de mens door natuurlijke en andere oorzaken toch al is blootgesteld. Een veilige of onschadelijke hoeveelheid straling wordt niet erkend. Dit houdt in dat reeds de lozingen via de schoorsteen en het koelwater van een normaal werkende kerncentrale als milieuverontreiniging worden beschouwd, ook al blijven deze binnen de grenzen van de stralingsdosis waaraan de mens ook zonder kerncentrales is blootgesteld. Veel grotere gezondheidsproblemen worden verwacht van de opslag van opgewerkte splijtstoffen en ander radioactief afval en van de splijtstofopwerking. Grote twijfel bestaat aan de mogelijkheid om radioactieve stoffen met een lange halveringstijd zodanig op te slaan, dat de straling de biosfeer niet zal aantasten. Berging in zoutkoepels wordt als een onverantwoorde gok gezien.

Zijn de bezwaren tegen een goed werkende centrale al groot, wat echter als er ongelukken gebeuren? Weliswaar wordt de kans op grote ongevallen gering geacht, maar het effect ervan kan zo groot zijn dat zelfs een minieme kans onaanvaardbaar

wordt. In dit verband wordt er graag op gewezen dat geen verzekeraar bereid is zich voor de schade, ongeacht de omvang, garant te stellen en dat geen elektriciteitsbedrijf in staat is een redelijke verzekering voor een kerncentrale af te sluiten.

Maar zelfs wanneer de bedrijfsveiligheid groot is zouden rampen kunnen geschieden, bijvoorbeeld doordat een vliegtuig op een kerncentrale neerstort. Kerncentrales zouden gewilde objecten van sabotage kunnen zijn, op transporten van splijtstoffen kunnen overvallen worden gepleegd, plutonium kan ontvreemd worden voor de vervaardiging van kernwapens. Beveiliging daartegen zou zo uitgebreid moeten zijn dat we terecht zouden komen in een politiestaat, hetgeen een bedreiging van de democratische samenleving zou inhouden.

Aan de reeds genoemde bezwaren kunnen nog andere worden toegevoegd: gezondheidsbescherming van het personeel van kerncentrales, de hoge kosten van elektriciteit uit kernenergie, de eindigheid van de voorraden uraniumerts en de daaruit voortvloeiende wens tot het bouwen van peperdure kweekreactoren (waarmee men in de Verenigde Staten niet verder wenst te experimenteren). Belangrijker is echter de twijfel die is ontstaan over de noodzaak om kernenergie te benutten voor de opwekking van elektriciteit. Nog geen tien jaar geleden gingen overheid en elektriciteitsproducenten uit van een verdubbeling van de elektriciteitsbehoefte per tien jaar, hetgeen leidde tot de verwachting dat er in het jaar 2000 een produktievermogen van 70.000 MW zou moeten zijn tegenover een in 1970 gerealiseerd vermogen van 9.000 MW. Deze verwachting moest de noodzaak van kernenergie onderstrepen (9). De ontwikkeling is anders verlopen, maar thans worden de schaarste aan fossiele energiedragers en de hoge prijzen als argument ten gunste van de kernenergie naar voren geschoven (10). In kringen van tegenstanders wordt echter niet meer alles wat uit Den Haag komt voor zoete koek geslikt en worden andere oplossingen ter bestrijding van de energiecrisis aan de hand gedaan: energiebesparing, betere benutting van de huidige energieproduktie, aanwending van alternatieve energiebronnen.

Gezien het accent op de bezwaren tegen milieuverontreiniging behoeft het niet te verwonderen dat het eerste protest tegen de kernenergie is voortgesproten uit de milieubeweging die aan het einde van de jaren zestig ontstond (11). In Zeeland is de Vereniging Milieuhygiëne Zeeland vanaf haar oprichting in 1970 in het geweer tegen de kerncentrale Borssele met juridische acties en met voorlichting onder de bevolking en de volksvertegenwoordigers. In 1972 trad ook de Vereniging Milieudefensie, toen nog Raad voor de Milieudefensie, het strijdperk binnen, niet alleen met de reeds genoemde Kernenergienota, maar ook met juridische acties tegen Borssele en tegen de KEMA, die een vergunning had aangevraagd om zijn experimentele suspensiereactor in bedrijf te mogen stellen. Een andere milieugroepering, de Aktie Strohalm, was in 1973 de grote stimulator tegen de Kalkarheffing.

Nog altijd staat de milieubeweging in het voorste gelid in de strijd tegen de kernenergie, maar sinds 1973 is er een coalitie van groeperingen gegroeid die aangeduid wordt als de anti-kernenergiebeweging. Systematisch onderzoek naar de samenstelling van deze beweging is niet verricht, maar veel protest komen we tegen in kringen van 'bezorgde wetenschappers', in Nederland verenigd in de Vereniging van Wetenschappelijke Werkers, in universitaire instituten 'wetenschap en samenleving', onder aanhangers van kleinschalige technieken en van macrobiotisch voedsel, onder krakers, anti-imperialisten en anti-militaristen, in enkele kleinere linkse partijen en tegenwoordig ook onder de grotere linkse of links-liberale partijen.

Doordat aan de grote demonstraties tegen kernenergie vooral jongeren deelnemen kan gemakkelijk het beeld ontstaan waarin het protest tegen de kernenergie wordt geschetst als voornamelijk een emotionele uiting van jongeren die, in hun verzet

tegen een weinig perspectief biedende samenleving, tegelijk met de wegwerpmaatschappij ook de kernenergie verwerpen. Het lijkt raadzaam dit beeld niet vol te houden, omdat het voorbijgaat aan de argumenten die tegen de kernenergie worden aangevoerd en omdat het de heterogene samenstelling van de AKB veronachtzaamt.
De heterogeniteit van de AKB komt ook tot uiting in de diversiteit van strategieën die worden gehanteerd om invloed uit te oefenen. Demonstraties zijn een middel om bezwaren naar buiten te brengen en de problematiek van de kernenergie onder de aandacht van de bevolking en de massamedia te brengen. Blokkades, hoewel als vorm van directe actie bedoeld om het normale functioneren van kernactiviteiten te onderbreken, krijgen toch vooral een demonstratief karakter. Om veranderingen in de besluitvorming te bereiken zijn echter andere strategieën nodig: ongewenste beslissingen voorkomen en genomen beslissingen via de rechter aanvechten waar dat maar mogelijk is. Op beide fronten is de AKB actief.
Een boeiend voorbeeld van een poging om uitstel van een beslissing te bereiken was de advertentie, begin 1976, van een aantal vooraanstaande Nederlanders, gericht tot de leden van de Tweede Kamer met de aanhef: 'Geef ons het voordeel van de twijfel'. De advertentie was ondertekend en gefinancierd door 1.200 landgenoten, voornamelijk academici. Was dit misschien de meest in het oog springende poging tot beïnvloeding, zwaarwegender zijn toch de minder op reputatie en meer op inhoud gebaseerde nota's, zoals die zijn gepubliceerd door de Werkgroep Kernenergie van Milieudefensie en van de Bezinningsgroep (12). Grote aandacht kregen de Boerderijcahiers van de Technische Hogeschool Twente, waarvan er één zelfs de aanleiding vormde tot het verzoek van de Minister aan de Gezondheidsraad om een aanvulling te geven op een rapport uit 1975 (13). Van grote invloed is de deelname van de zijde van tegenstanders van kernenergie geweest aan de planologische kernbeslissing over het Aanvullend Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (ASEV) in 1977. De inspraak over de vestigingsplaatsen van de drie kerncentrales die in de Energienota van 1974 waren voorzien, mondde uit in een dispuut over de vraag of kernenergie wel nodig was. Het is ondenkbaar dat de AKB verstek zal laten gaan bij de maatschappelijke discussie die o.m. over deze vraag zal gaan, omdat al vanaf 1972 de tegenstanders en twijfelaars aansturen op een zo breed mogelijke discussie. Ondertussen gaat ook de stroom van publicaties voort waarmee de kernenergie wordt bestreden, zoals de zeer recente publicatie van het Landelijk Energie Komité over ongelukken met kernenergie.
De weg naar de rechter wordt vooral bewandeld wanneer bezwaarschriften tegen een vergunningaanvrage niet hebben gebaat. Dan wordt steevast een beroepsprocedure begonnen om schorsing en intrekking van de vergunning te bewerkstelligen. Ook andere juridische procedures worden niet geschuwd, zoals de civiele procedure of de inschakeling van de strafrechter, maar het oogmerk is dan veeleer naleving van overeenkomsten en voorschriften te bereiken dan het terugdraaien van een beslissing. Succes met beroepsprocedures heeft lang op zich laten wachten. De uitspraak inzake de KEMA suspensiereactor, die leidde tot intrekking van de werkvergunning, kwam pas na de beëindiging van het experiment. Eerst op grond van de Wet Algemene Bepalingen Milieuhygiëne kon het eerste effectieve succes worden behaald, toen in mei 1981 de vergunning voor de dumping van radioactief afval in de Atlantische Oceaan door de Raad van State werd geschorst.

De toekomst

Risico wordt vaak uitgedrukt in de formule kans × effect. Als men deze formule toepast op het risico dat de kernenergie zelf loopt, ziet de toekomst er somber uit voor de kernenergie in Nederland. De kans dat acties worden ondernomen is groot, het effect van acties lijkt toe te nemen. Met een brede maatschappelijke discussie in

het vooruitzicht is het dan ook begrijpelijk dat zij die overtuigd zijn van de noodzaak van kernenergie en van de verhoudingsgewijs geringe risico's ervan zullen trachten door het presenteren van feiten volgens de laatste stand van wetenschap en techniek een basis te verschaffen waarop een rationele, niet door emoties of vooroordelen beheerste beslissing kan worden genomen. In voorgaande hoofdstukken hebben de schrijvers daaraan een bijdrage geleverd. Hoopvolle verwachtingen ten aanzien van het effect van kennisvermeerdering dienen echter getemperd te worden door het besef dat er bij velen toch aan de onomstotelijkheid van de feiten getwijfeld zal worden, maar ook dat feiten alleen niet voldoende zijn als richtsnoer voor handelen. In technologische controverses zijn deskundigen het met elkaar oneens. Het gevolg is dat vele leken (en daartoe moeten wij de meeste volksvertegenwoordigers en vrijwel alle rechters rekenen) in onzekerheid geraken en zich in wanhoop afvragen welke feiten nu de juiste zijn. Leken hebben doorgaans niet de tijd om te trachten zich voldoende deskundigheid te verwerven en zich een eigen oordeel te vormen. Veeleer zullen zij steun zoeken bij de standpunten die ingenomen worden in de groepen en organisaties waartoe zij behoren. De informatie die centraal wordt verzorgd, wordt in maatschappelijke verbanden gefiltreerd en, van commentaar voorzien en min of meer compleet, naar de achterban doorgegeven. Het is dan ook twijfelachtig of de beoogde kennisverhoging wordt bereikt en tot een verandering van mening zal leiden (14).
In Amerika heeft Allan Mazur zich verdiept in controverses inzake drinkwaterfluoridering en kernenergie (15). Allereerst wijst hij erop dat discussies over feiten vertroebeld kunnen worden door retoriek. Retorisch noemt hij uitspraken als de volgende: 'stralingsgevaar is veruit het best onderzochte milieuprobleem'; 'het risico van kernenergie is veel en veel lager dan de risico's verbonden aan andere energiebronnen'. Ook Nederland kent zijn retoriek: 'kernafval is een bescheiden en technisch geheel oplosbare opgave, veel en veel eenvoudiger dan het afvalprobleem dat in Nederland ontstaat met het verstoken van 25 miljoen ton steenkool per jaar' (16). Retorische uitspraken zijn beweringen waarbij de bewijslast van het tegendeel bij de andere partij wordt gelegd. Zo concludeert de Kroon inzake de lozingsvoorschriften in de werkvergunning voor de kerncentrale Borssele 'dat niet is gebleken van omstandigheden op grond waarvan thans voor de onderwerpelijke inrichting een lagere waarde zou moeten worden vastgelegd'.
Verwarring kan ook ontstaan, aldus Mazur, doordat vaak niet opgehelderd wordt dat zeer verschillende uitkomsten van berekeningen voortvloeien uit zeer verschillende vooronderstellingen en uitgangspunten. Gofman en Tamplin berekenden het aantal extra sterfgevallen aan leukemie en kanker als gevolg van extra stralingsbelasting door kerncentrales en kwamen, onder zekere veronderstellingen, op 32.000 uit (17). Zo'n getal wordt overgenomen en gaat een eigen leven leiden; de uitgangspunten voor de berekening worden overgeslagen (18).
Kan in de hiervoor bedoelde verwarring nog wel klaarheid gebracht worden, anders ligt dit bij uitspraken en uitkomsten waarvan de betekenis niet ondubbelzinnig duidelijk is. Als voorbeeld noemt Mazur het strijdpunt van de drempelwaarde voor onschadelijke stralingsdoses. Het probleem met dergelijke waarden is dat hun geldigheid gerelateerd is aan de stand van de wetenschap, zoals expliciet tot uitdrukking is gebracht in de definitie van een MAC. Een MAC is de maximaal aanvaardbaar geachte concentratie van een giftige stof waaraan arbeiders op de werkplek mogen worden blootgesteld. Op grond van nieuwere kennis zijn sommige MAC-waarden verlaagd (die voor vinylchloride bijvoorbeeld met een factor 500) en andere verhoogd (die voor calciumarsenaat: tienmaal) (19). Een element van onzekerheid blijft echter bestaan.
Dit wordt mede veroorzaakt door twijfel aan de oprechte bedoelingen van belanghebbenden. Naarmate strengere voorschriften worden gegeven ter voorkoming van milieuverontreiniging, worden de kosten van de te nemen maatregelen hoger. Het

kan dus voor diegenen die voor de kosten moeten opdraaien verleidelijk zijn te geloven dat er drempelwaarden zijn waaronder geen gevaar voor de gezondheid meer te duchten is. Dit soort achterdocht speelt zeker mee in de beoordeling van wat als feit wordt gepresenteerd.

Een beslissing over een toekomst met kernenergie is echter niet alleen een kwestie van wetenschappelijke feiten. Elk beleid is een combinatie van feiten én waarden. (Dat geldt zelfs voor een beleid waarin moet wat kan.) De Gezondheidsraad heeft duidelijk oog gehad voor dit onderscheid, door zich wel over het risico van ioniserende straling uit te spreken maar een beslissing over het aanvaarden ervan over te laten aan de samenleving en haar beleidsbepalende vertegenwoordigers. Eens heeft het parlement zich bereid getoond een risico te willen aanvaarden door ermee akkoord te gaan dat de Staat enige honderden miljoenen aan schadevergoedingen zal betalen voor het zeer onwaarschijnlijk geachte geval van een groot ongeval met kernenergie (20).
Thans zullen onze parlementariërs zich opnieuw moeten verdiepen in risico-schattingen en de mate van aanvaardbaarheid van risico's. Hun positie is weinig benijdenswaardig. Van hen wordt een oordeel gevraagd over feiten die omstreden of dubbelzinnig zijn. Medeverantwoordelijk voor de energievoorziening in de toekomst, zullen zij de risico's van kernenergie moeten afwegen tegen de mogelijkheden van alternatieve energiebronnen en energiebesparing, waarin tegenstanders van kernenergie veel vertrouwen hebben, maar waaromtrent weinig vaststaat. Onze volksvertegenwoordigers zullen zich moeten afvragen of wij ons nageslacht gevulde zoutkoepels of lege gasvelden zullen nalaten. Maar meer nog drukt op hen de zorg voor de huidige generatie en zullen zij zich moeten uitspreken over de aanvaardbaarheid van, zij het nog zo geringe, gezondheidsrisico's. Zoals gezegd is dit mede een kwestie van waarden, van politiek-ethisch besef. De feiten spreken geen oordeel, dat zullen onze parlementariërs moeten doen.

Leiden, juli 1981

Referenties

(1) Instelling van een Commissie voor de Atoomenergie, oprichting van het Reactor Centrum Nederland (RCN), eerste overeenkomst over het niet-militair gebruik van atoomenergie met de Verenigde Staten.

(2) *Nota inzake de Kernenergie*, Tweede Kamer, zitting 1956-1957, nr. 4727.

(3) Zie bijvoorbeeld *De Uitdaging van het Atoom*, publicatie van de Wiardi Beckman Stichting, Amsterdam 1958.

(4) Borsele met één s slaat op de gemeente, Borssele met ss is de naam van de kerncentrale.

(5) In voorbereiding: M. Rimmelzwaan en E. Abma, *Juridische Acties tegen Kernenergie.*

(6) *Kernenergienota*, Werkgroep Kernenergie van de Raad voor de Milieudefensie, 1972.

(7) *Wet Financiering Ontwikkeling Snelle Kweekreactor.* Tweede Kamer, zitting 1972-1973, nrs. 12056 en 12076.

(8) Voor de geschiedenis van de AKB leze men:
J. Hontelez en W. Combrink, Ontstaan en Ontwikkeling van de Anti-Kernenergiebeweging. *Socialistisch Perspectief,* april 1977, blz. 14-33.
J. van den Broek en J. Meijnen, De Anti-Kernenergiebeweging in Nederland. *Paradogma VIII* (december 1977), blz. 3-28.
W. Ronken en R. ter Bogt, *De Atoomlobby in het Moeras der Anti's.* Stencil, Nijmegen 1980.
Voor een sociologische benadering:
E. Abma, H.P.M. Jägers en G.J. van Kempen, Kernenergie als Maatschappelijke Splijtstof. Een Analyse van een Protestbeweging. In: P. Ester en F. Leeuw (red.), *Energie als Maatschappelijk probleem,* Van Gorcum, Assen 1981.

(9) *Nota inzake het Kernenergiebeleid.* Tweede Kamer, zitting 1971-1972, nr. 11761.

(10) *Nota Energiebeleid.* Tweede Kamer, zitting 1979-1980, nr. 15802 (3 delen).

(11) E. Tellegen, Oude en Nieuwe Milieuorganisaties. In: P. Ester (red.), *Sociale Aspecten van het Milieuvraagstuk.* Van Gorcum, Assen 1979.

(12) *Bezinningsnota Kernenergie,* 1974.
Tweede Bezinningsnota Kernenergie, 1975.
Een andere strategie voor de elektriciteitsproduktie, januari 1980.

(13) *Kernenergie in Discussie.* Boerderijcahier 7502, december 1975. Daarop aansluitend:
Kleine Kansen – Grote Gevolgen. Boerderijcahier 7601, 1976.

(14) Roger E. Kasperson e.a., Public Opposition to Nuclear Energy. In: *Sociopolitical Effects of Energy Use and Policy.* NAS, Washington DC 1979, blz. 260-292.

(15) Allan Mazur, Disputes between Experts. *Minerva XI* (1973), blz. 245.

(16) H. van der Laan, Energie en de Nederlandse Toekomst. Christen-Democratische Verkenningen 4/81, 1981, blz. 219.

(17) J. Gofman en A. Tamplin, *Poisoned Power.* Emmaus, Pa 1971.

(18) Bijvoorbeeld in K.S. Shrader-Frechette, *Nuclear Power and Public Policy.* Reidel, Dordrecht, 1980.

(19) MAC-waarden. Veilig Ademen op het Werk. *Cahiers Biowetenschappen en Maatschappij,* 5e jaargang no. 3 (1979), blz. 30.

(20) *Wet Wettelijke Aansprakelijkheid Kernenergie,* 1965.

AANHANGSEL

STRALINGSGROOTHEDEN EN EENHEDEN

C.E. Rasmussen

In deze bijlage wordt een beknopt overzicht gegeven van de fysische grootheden die van belang zijn voor de kwantitatieve beschrijving van stralingsbronnen en van interactie van ioniserende straling met materie. Naast de eenheden van het internationale stelsel (SI) worden ook de bij tal van lezers nog ingeburgerde 'oude' eenheden vermeld. Voor een volledig overzicht zij verwezen naar publicaties van de *International Commission on Radiation Units and Measurements* ICRU (1, 2).

Radioactiviteit

De *activiteit A* van een hoeveelheid radioactief nuclide in een bepaalde energietoestand op een gegeven tijdstip is het quotiënt *dN/dt*, waarin *dN* de verwachtingswaarde is van het aantal spontane overgangen van atoomkernen vanuit de beschouwde energietoestand, binnen het tijdsinterval *dt*.

Eenheid:	becquerel (Bq)	$= 1\ s^{-1}$
	curie (Ci)	$= 3{,}7 \times 10^{10}\ s^{-1}$

De *vervalconstante* λ van een radioactief nuclide in een bepaalde energietoestand is het quotiënt *dP/dt*, waarin *dP* de kans is dat een gegeven atoomkern vanuit de beschouwde energietoestand, binnen het tijdsinterval *dt*, een spontane overgang ondergaat.
Eenheid: s^{-1}
Onder de *halveringstijd* $T_{½}$ van een radioactief nuclide verstaat men de tijd waarin de activiteit van een hoeveelheid van dat nuclide met de helft afneemt, d.w.z. $T_{½} = (\ln 2)/\lambda = 0{,}693/\lambda$.

Dosimetrie

De invloed van ioniserende straling op materie is afhankelijk van de intensiteit van het stralingsveld en van de mate van interactie tussen de beschouwde straling en materie. Deze interactie resulteert in afgifte van stralingsenergie aan de materie.
Een maat hiervoor is de *geabsorbeerde dosis D* (ook wel kortweg dosis genaamd), gedefinieerd als het quotiënt $d\bar{\varepsilon}/dm$, waarin $d\bar{\varepsilon}$ de gemiddelde energie is die door ioniserende straling is afgestaan aan materie met massa *dm*.

Eenheid:	gray (Gy)	$= 1\ J kg^{-1}$
	rad	$= 10^{-2}\ J kg^{-1}$

De tijdsafgeleide van de dosis noemt men het *dosistempo* : $\dot{D} = dD/dt$, eenheid $Gy\ s^{-1}$ of $rad\ s^{-1}$.
In het algemeen zal de dosis in een hoeveelheid materie van plaats tot plaats ver-

schillen; veelal bepaalt men de gemiddelde dosis in een bepaald volume.
Uitsluitend voor het karakteriseren van röntgen- of gammastralingsvelden wordt vaak gebruik gemaakt van de *exposie* X, gedefinieerd als het quotiënt dQ/dm, waarin dQ de absolute waarde is van de totale lading van de ionen van één teken die in lucht worden geproduceerd wanneer alle elektronen, vrijgemaakt door fotonen in een hoeveelheid lucht met massa dm, geheel tot stilstand worden gebracht in lucht.

Eenheid: Ckg^{-1}
röntgen (R) = $2{,}58 \times 10^{-4}$ Ckg^{-1}

Bij een exposie van 1R bedraagt de dosis D in lucht 0,87 rad en in weefsel 0,96 rad.

De biologische werkzaamheid van een stralingsdosis D bij de mens wordt voor de meeste stralingshygiënische toepassingen afgeleid uit het produkt van de dosis D en een weegfactor Q. De aldus gewogen geabsorbeerde dosis (DQ) heet het *dosis-equivalent (H)*.

Eenheid: sievert (Sv) = 1 Jkg^{-1}
rem = 10^{-2} Jkg^{-1}

De numerieke waarden van de dimensieloze factor Q, die *kwaliteitsfactor* wordt genoemd, hangen af van de aard en energie van de beschouwde straling. De ICRU heeft een numerieke relatie aangegeven tussen Q en de *lineieke energie-overdracht* L_∞ van straling in water (L_∞ is de dicht langs de baan van de geladen deeltjes afgegeven energie, per eenheid van baanlengte).
Voor praktisch gebruik worden de onderstaande afgeronde waarden voor Q aanbevolen:

stralingstype	kwaliteitsfactor Q
fotonen en elektronen	1
neutronen, protonen en enkelvoudig geladen deeltjes met massagetal > 1, van onbekende energie	10
alfa-deeltjes en meervoudig geladen deeltjes (en deeltjes met onbekende lading), van onbekende energie	20

De stralingsbelasting van een groep personen kan worden uitgedrukt als het *collectieve dosisequivalent*, de som van de individuele dosisequivalenten in het gehele lichaam dan wel in bepaalde organen of weefsels. In het eerstgenoemde geval gebruikt men als eenheid mansievert of manrem.
De gevolgen voor het menselijk organisme bij blootstelling van afzonderlijke organen of weefselsystemen aan eenzelfde waarde van het dosisequivalent lopen aanmerkelijk uiteen. De *International Commission on Radiological Protection* ICRP (3, 4) heeft voor een aantal organen en weefselsystemen weegfactoren w_T aanbevolen, waarin het risico op ernstige stochastische effecten (inductie van fatale vormen van kanker en ernstige genetische effecten) is verdisconteerd.
Het *effectieve dosisequivalent* H_E wordt vervolgens gedefinieerd als de som van de gewogen dosisequivalenten $w_T H_T$ in de afzonderlijke organen en weefselsystemen.

Eenheid: sievert (Sv) = 1 Jkg^{-1}
rem = 10^{-2} Jkg^{-1}

De aanbevolen numerieke waarden voor de dimensieloze weegfactor w_T zijn:

orgaan/weefselsysteem	w_T
gonaden	0,25
borsten (gemiddelde m/v)	0,15
rode beenmerg	0,12
longen	0,12
schildklier	0,03
botoppervlakken	0,03
overige *)	0,30

*) w_T = 0,06 voor elk van de vijf niet afzonderlijk genoemde organen die het hoogste dosisequivalent ontvangen (hiertoe niet te rekenen de handen, onderarmen, voeten, enkels, huid en ooglens).

Referenties

(1) *Radiation Quantities and Units.* International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 33, 1980.

(2) *Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent.* International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 25, 1976.

(3) Recommendations of the ICRP, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, 1977. *Annals of the ICRP*, Vol. 1 Nr. 3.

(4) Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 28, 1978. *Annals of the ICRP*, Vol. 2 Nr 1.

DE NATUURLIJKE KERNREACTOREN BIJ OKLO (GABON)

A.J. van Loon

Natuurlijk uranium bezit in ons gehele zonnestelsel een constante isotopenverhouding. Uranium-238 vormt met 99,2798% de hoofdmoot en uranium-235 maakt 0,7171% uit. Dat betekent dat andere isotopen (o.a. uranium-234) in vrijwel verwaarloosbare hoeveelheden aanwezig zijn (samen ca. 0,003%). Deze verhouding is niet altijd gelijk geweest. Doordat uranium-235 een geringere halveringstijd heeft dan uranium-238, is het aandeel ervan geleidelijk afgenomen. Het valt eenvoudig te berekenen dat bij het begin van de geschiedenis van de aarde (ca. 4,6 miljard jaar geleden) uranium-235 omstreeks 25% van al het uranium moet hebben gevormd.

Tekort aan uranium-235

Ondanks de vaste verhouding tussen uranium-235 en uranium-238 wordt het natuurlijk uranium routinematig onderzocht op de isotopensamenstelling, o.a. wanneer het in de vorm van uraniumhexafluoride (UF_6) verrijkt moet worden. Op die manier kan worden vastgesteld of een 'verse' partij natuurlijk uranium niet is vermengd met een partij verarmd uranium dat in de lichtwaterreactoren niet direct versplijtbaar is.
In mei 1972 werd in het Franse Pierrelatte bij zo'n routine-analayse opgemerkt dat er een tekort aan uranium-235 was. Dit leidde tot een onderzoek door het *Commissariat à l'Energie Atomique,* waarbij men stap voor stap de weg terugging die het uranium had afgelegd. Uiteindelijk kon worden vastgesteld dat al in het erts van de mijn (die ontgonnen werd door de *Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville*) een tekort aan uranium-235 moest hebben bestaan. Dat was op zijn minst merkwaardig, want uit deze mijn bij Oklo (in Gabon) werd al sinds 1970 uranium gewonnen zonder dat er ooit afwijkingen waren aangetroffen.
Het was inmiddels medio 1972 geworden en bij meer zendingen werd een tekort aan uranium-235 geconstateerd: in totaal leek er zo'n 200 kg uranium-235 uit het erts te zijn verdwenen. Het erts werd toen aan de hand van boormonsters uitvoerig geanalyseerd. Daarbij bleek dat op de meeste plaatsen sprake was van een 'normale' isotopenverhouding, maar dat er plaatselijk anomalieën optraden, die zich steeds uitten in een tekort aan uranium-235. In één bepaald monster vormde die isotoop zelfs niet meer dan 0,44%.

Kernsplijting

Het chemisch identieke gedrag van uranium-238 en uranium-235 sluit uit dat een van deze isotopen selectief verdwijnt door processen zoals chemische verwering: er moet een fysische oorzaak zijn. Die werd ook plotseling duidelijk toen een nauwkeurige analyse van de ertsen aantoonde dat er splijtingsprodukten in voorkwamen, en wel des te meer naarmate het erts armer aan uranium-235 was. Dat kon maar op één manier uitgelegd worden: er moest een deel van het uranium-235 zijn verspleten.
Een inventarisatie van de gehele groeve bracht vervolgens aan het licht dat er binnen een afstand van ongeveer 120 meter in totaal vier complexen bestonden (alle met een uitgestrektheid van enkele tientallen meters), die deelgenomen hadden aan het splijtingsproces. Oorspronkelijk dacht men zes van deze 'natuurlijke reactoren' te hebben gevonden, maar daarvan blijken inmiddels twee 'paren' bij elkaar te behoren. Vanwege de voortgang bij de uraniumwinning heeft men de reactoren afgegraven, op één deel na. Op zijn zandstenen ondergrond wil men dat bewaren als geologisch, fysisch en nucleair monument.
Een analyse van de geologische situatie leidde aanvankelijk tot de schatting dat de reactoren zo'n 1,7 miljard jaar geleden gewerkt moesten hebben. Inmiddels is er nadere informatie beschikbaar gekomen, o.a. uit een inventarisatie van de splijtingsprodukten en de daaruit voortgekomen vervalprodukten. De ouderdom van de reactoren wordt nu, althans wat hun werkzame periode betreft, geschat op omstreeks 2 miljard jaar.
De lensvormige lichamen, waarin de splijtingsprocessen zich hebben voorgedaan, bevatten gezamenlijk ongeveer 800 ton uranium; het totale gebrek aan uranium-235 is vastgesteld op 607 kg. Rekening houdend met de verschillen in halveringstijd van uranium-238 en uranium-235 kan men hieruit berekenen dat de reactoren gezamenlijk omstreeks 15 GW-jaar aan warmte hebben geproduceerd. De samenstelling van de splijtingsprodukten toont aan dat de reactoren enkele honderdduizenden jaren moeten hebben gewerkt.

Oorzaak

In 1975 vond in Libreville een symposium plaats over 'het verschijnsel Oklo' (1). Sindsdien is het onderzoek echter voortgegaan; veel resultaten daarvan zijn terug te vinden in het verslag van een bijeenkomst die in december 1977 te Parijs werd gehouden over ditzelfde onderwerp (2). Tijdens deze laatste bijeenkomst heeft men ook de oorspronkelijke verklaring voor het optreden van de natuurlijke reactoren kunnen herzien. Op zichzelf een interessant gegeven, want waarom traden dergelijke reactoren juist bij Oklo in werking en waarom gebeurde dat juist 2 miljard jaar geleden?

Men moet zich voorstellen dat Oost-Gabon ruim 2 miljard jaar geleden deel uitmaakte van een enorm dalend bekken. Water dat hierheen afstroomde voerde zowel zand- en slibdeeltjes, alsook uranylionen mee, afkomstig van verweerde uraniumertsen in het achterland. Deze uranylionen bleven achter in het poriënwater tussen de zandkorrels. De restanten van primitief leven zorgden dat de afzettingen een enigszins bitumineus karakter kregen; daarvoor was mede de aanvoer van slibdeeltjes verantwoordelijk, omdat zo een afscherming van de lucht werd verkregen waardoor het organisch materiaal voor oxydatie werd behoed.

De sedimentpakketten bleven zich in het dalende gebied opstapelen, waardoor de druk in de diepere lagen sterk toenam. Mede door het reducerende karakter, ten gevolge van het organische materiaal, sloegen de uranylionen neer en vormden het mineraal pekblende (U_3O_8). Toen zich in totaal een ca. vier kilometer dik pakket had gevormd, werd een groot deel van het bekken weer opgeheven, waarbij de huidige ertsen in Oklo hun scheve stand van ca. 45° verkregen. Tegelijkertijd ontstonden er rekspleten in het gesteente, wat een nieuwe, grote toevoer mogelijk maakte van met uranylionen beladen water. Opnieuw leidde dat tot de vorming van pekblende, in dit geval omdat het aanwezige pyriet (FeS_2) een reducerende werking had.

Deze nieuwe situatie leidde lokaal tot zo'n grote concentratie van uranium (tot 60%!) dat de natuurlijke neutronenvermenigvuldigingsfactor boven de één kwam te liggen; met andere woorden: er kwam een kettingreactie op gang. Daarbij steeg de temperatuur tot boven de 500°C (zoals uit mineralogische gegevens blijkt), maar door de grote druk begon het dieptewater niet te koken. Wel ontstonden er convectiestromen, die de warmte verspreidden en die tal van mineralen in oplossing deden gaan. Deze oplossingen drongen o.a. door in de omringende, uit klei ontstane gesteenten en zetten daarin de meegevoerde stoffen af in de vorm van hydrothermale aders.

Een ander gevolg was dat het organische materiaal in de reactiezone volledig verwoest was en dat de pekblende werd omgezet in het mineraal uraniniet. Er bestaan dan ook karakteristieke verschillen tussen het 'gewone' erts in Oklo (0,2-0,5% uranium, uranium aanwezig in de vorm van pekblende, aanwezigheid van bitumineus materiaal) en de reactiezones (tot 60% uranium, voorkomend in de vorm van uraniniet; geen bitumineus materiaal).

Een verzakking zorgde er in een latere fase voor dat plaatselijk de uraniumconcentratie zo hoog werd, dat het kernsplijtingsproces zich tot nabijgelegen plaatsen kon uitbreiden. Dat verklaart de aanwezigheid van enkele reactoren vlak bij elkaar.

Er kwam een einde aan het proces toen de omstandigheden geleidelijk minder gunstig werden, waardoor de neutronenvermenigvuldigingsfactor daalde tot onder de één. Hierbij werd wellicht een belangrijke rol gespeeld door de isotopenverhouding. Twee miljard jaar geleden bevatte het natuurlijk uranium ca. 3% uranium-235, juist het percentage dat ook nu gebruikt wordt in de licht-verrijkte splijtstof voor lichtwaterreactoren. Toen een deel van het uranium-235 verspleten was, was mogelijk de concentratie te gering geworden om het splijtingsproces in stand te houden.

Andere reactoren

In ons hele zonnestelsel moet zo'n 2 miljard jaar geleden het uranium-235 ongeveer 3% van het natuurlijk uranium hebben gevormd. Dat betekent dat in gunstige omstandigheden (concentratie van uranium en aanwezigheid van een moderator) ook elders natuurlijke reactoren moeten kunnen hebben gewerkt. Inderdaad vindt men ongeveer een kilometer ten zuiden van Oklo, in Okelobondo, aanwijzingen voor eenzelfde situatie (3).
Op het Colorado-Plateau (Verenigde Staten) treft men eveneens uitgestrekte uraniumertsen aan met een tekort aan uranium-235. Het ziet er naar uit dat daar in totaal zeker vijf ton van deze isotoop is verspleten (4), wat ruim acht keer zoveel is als bij Oklo. In onderzochte monsters is het gehalte aan uranium-235 daar soms niet meer dan 0,4%. Of er sprake is van natuurlijke reactoren, heeft men nog niet kunnen vaststellen, maar een andere verklaring voor dit verschijnsel lijkt niet eenvoudig.

Kernsplijtingsafval

De natuurlijke reactoren zijn niet alleen wetenschappelijk van groot belang, maar ze hebben nog een bijzonder aspect: het verspleten uranium-235 is omgezet in splijtingsprodukten die voor een deel hoog-actief moeten zijn geweest. Ook zijn er uiteraard transuranen gevormd (waaronder plutonium, dat tienduizenden jaren moet hebben bestaan).
De splijtingsprodukten en hun eindprodukten heeft men opgespoord. Daarbij is gebleken dat er gedurende de twee miljard jaar van hun bestaan geen migraties van betekenis zijn opgetreden. Dat is des te meer opvallend omdat het dieptewater in convectiestromen heeft gecirculeerd. Maar een deel van de gevormde produkten is zelfs niet buiten het uraniummineraal gekomen en de produkten die dat wel deden zijn slechts weinig getransporteerd doordat de heersende Eh en pH dat tegengingen.
Een dergelijk langdurig isolement van het kernsplijtingsafval in ongecontroleerde en niet speciaal daartoe ingerichte omstandigheden toont aan dat een veilige opslag mogelijk is; dus ook voor het afval van de huidige en toekomstige kernenergiecentrales. Als we in beschouwing nemen dat opslag eigenlijk niet langer dan duizend jaar hoeft te duren (5) dan vormt Oklo wel het bewijs dat ondergrondse opslag uitermate veilig kan plaatsvinden (zie ook elders in dit boek).

Referenties

(1) *Le Phénomène d'Oklo*, C.R. Colloque, Libreville. International Atomic Energy Agency, Wenen 1975.

(2) *Les Réacteurs de Fission Naturels*. C.R. Rèunion, Paris 1977. International Atomic Energy Agency, Wenen 1978.

(3) J.A. Goedkoop, Spitten in Kernsplijtingsafval. *Energiespectrum 2* (1978), blz. 50-53.

(4) G.A. Cowan, A Natural Fission Reactor. *Scientific American 235* (1976), blz. 36-47.

(5) B. Verkerk, Bijdrage tot de Veiligheidsbeoordeling van het Opbergen van Radioactief Afval in Zout. *Energiespectrum 5* (1981), blz. 124-132.

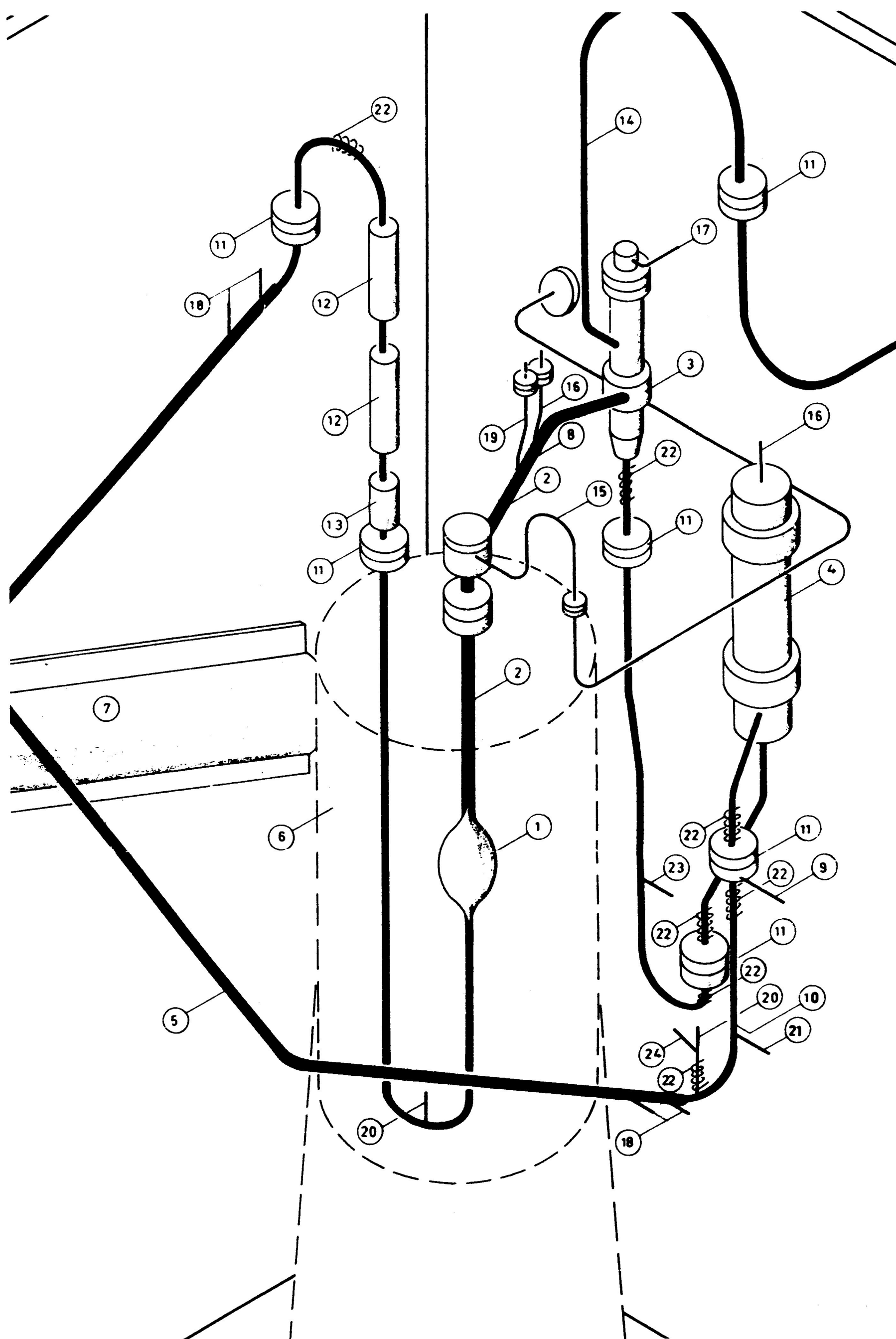
DE KEMA SUSPENSIE-TESTREACTOR

J. Kuypers

De beperktheid van splijtstofvoorraden in de aardkorst heeft geleid tot de ontwikkeling van splijtingsreactoren, waarin behalve direct splijtbare kernen ook niet-splijtbare kernen via een omweg (conversie) kunnen worden gespleten. Bij de KEMA is ruim twee decennia gewerkt aan de ontwikkeling van zo'n conversiereactor. Dit onderzoek heeft geresulteerd in een proefreactor met een vermogen van 1 MW, de KEMA suspensie-testreactor, en in het ontwerp van een prototype-centrale met een vermogen van 250 MW(e). De proefreactor is tussen 1974 en 1977 bij tussenpozen in bedrijf geweest en zal hierna in het kort worden beschreven. Van de bouw van het prototype is afgezien, onder andere omdat andere ontwikkelingen op het gebied van kweekreactoren (met name de snelle kweekreactoren) inmiddels verder waren voortgeschreden.

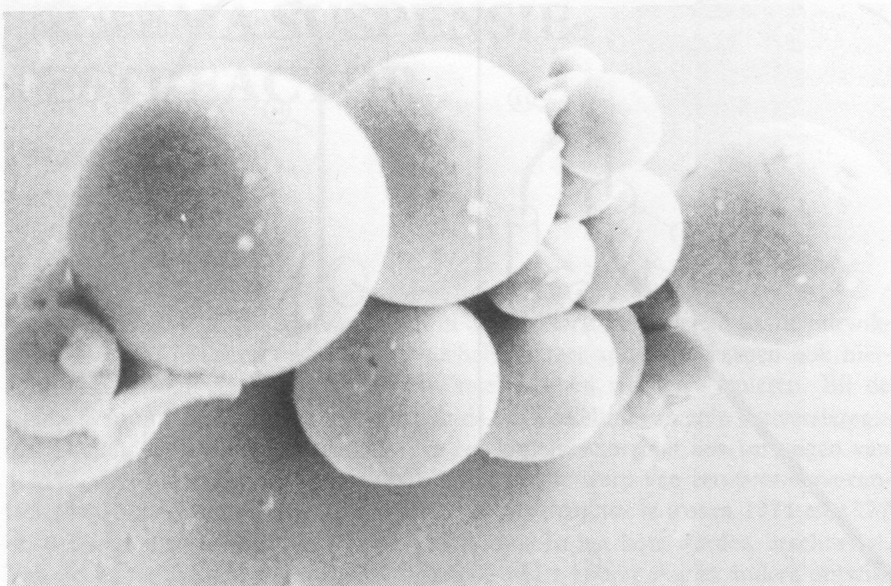
De KEMA suspensie-testreactor (KSTR) is gebaseerd op een heel eenvoudig principe. De voornaamste onderdelen zijn een reactorvat, een warmtewisselaar en een pomp (zie figuur 1). De splijtstof is in de vorm van kleine bolletjes (gemiddelde diameter 0,005 mm, zie figuur 2) gesuspendeerd in water, dat als koelmiddel en remstof dienst doet. In het reactorvat wordt een kritische toestand bereikt en dus warmte opgewekt: de gemiddelde temperatuur is daar 250°C en om koken van het water te voorkomen is de druk in het systeem opgevoerd tot 60 bar.
De splijtstof is samengesteld uit een mengsel van uranium- en thoriumoxyden en bestaat voor 22,5% uit $^{235}UO_2$, voor 2,5% uit $^{238}UO_2$ en voor 75% uit $^{232}ThO_2$. Bij de vangst van een thermisch neutron, afkomstig van de splijting van uranium-235, wordt thorium-232 via protactinium-233 omgezet in het splijtbare uranium-233. De kleine afmeting van de splijtstofbolletjes maakt dat de meeste splijtingsprodukten bijna ogenblikkelijk in het water terechtkomen, waardoor de splijtingswarmte snel wordt afgevoerd. De prompte negatieve temperatuurscoëfficiënt die hiervan het gevolg is, kan iedere snelle toename van de reactiviteit opvangen en maakt het systeem intrinsiek veilig. Omdat geen constructiematerialen in de kern aanwezig zijn en ook geen regelstaven nodig zijn om de reactiviteit te sturen, gaan weinig neutronen verloren. Men regelt de gemiddelde temperatuur in de reactor door de suspensieconcentratie te veranderen (met een hydrocycloon). Onttrekt men vermogen aan de reactor, dan ontstaat een temperatuursverschil over het reactorvat dat daaraan evenredig is. Omdat de splijtingsprodukten grotendeels in het water terecht komen, kunnen ze continu worden verwijderd. Bij de betrekkelijk kleine kern van de KSTR vond nogal wat neutronenlekkage plaats door de wand van het reactorvat (zie figuur 3). Daarom werd dit vat omgeven door een neutronenreflector (uit berylliumoxyde en grafiet). Niettemin was er toch sprake van een neutronenarmoede, waardoor de conversiefactor (zie hoofdstuk 2) onder de 1 bleef. Theoretisch is een factor 1,28 haalbaar met uranium-233 als splijtstof. Neutronenverlies treedt echter op door de eindige kerngrootte en door vangst in splijtingsprodukten, constructiematerialen en remstof.

De ontwikkeling van de KSTR begon met het onderzoek van de fysische eigenschappen van een subkritisch ensemble. De resultaten van dit onderzoek moedig-



Figuur 1
Perspectiefschets van de KSTR.

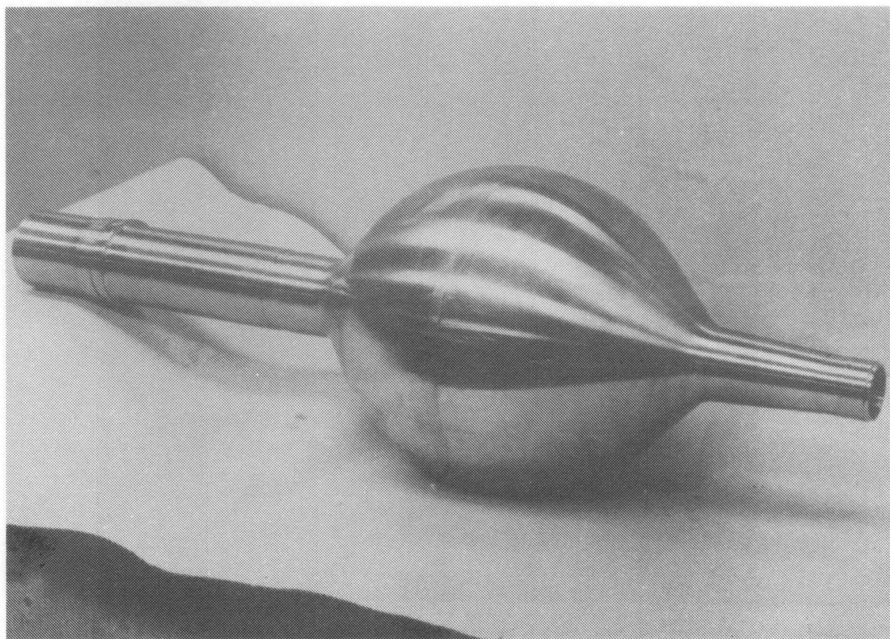
1 **reactorvat;**
2 **gas liquid contactor;**
3 **ontgasser;**
4 **pomp;**
5 **warmtewisselaar;**
6 **drukvat;**
7 **instrumentenbuis;**
8 **venturi;**
9 **naar afsluiter 1 en 2.**
10 **pitot;**
11 **flensverbinding;**
12 **verwarming;**
13 **temperatuur-opnemer;**
14 **uitlaatleiding;**
15 **H_2 toevoer gasinjectie;**
16 **ontluchting pomp;**
17 **H_2 toevoer niveau-meting;**
18 **koelleidingen PCSA;**
19 **retour water;**
20 **dumpleiding;**
21 **monstername-leiding;**
22 **vriesspiralen;**
23 **naar ss. afsluiters 41, 31 en 32;**
24 **naar afsluiter 41.**



Figuur 2
Splijtstofbolletjes, met een gemiddelde diameter van 0,005 mm, van UO_2/ThO_2, gefabriceerd volgens de sol-gel-methode en gesinterd bij 1400°C (vergroting 20.000 maal).

den ertoe aan de ontwikkeling voort te zetten (1). Parallel hieraan werd het sol-gel-proces voor het maken van de splijtstofbolletjes ontwikkeld (2) en werd het gedrag van de suspensie bij hoge temperaturen in proefinstallaties onderzocht. De KSTR werd vervolgens gebouwd om de nucleaire en technische aspecten van het bedrijf van een suspensiereactor te leren kennen. Op basis hiervan is een ontwerp gemaakt van een grote vermogensreactor met een vermogensdichtheid van 32 kW per liter en met zwaar water (in plaats van gewoon water) als koelmiddel en remstof (3). Figuur 4 toont enkele details van het centrale compartiment van de KSTR, waarin het reactorvat en de circulatiepomp zijn ondergebracht. Na het oplossen van een aantal problemen bij de instrumentatie, de controle op de splijtstofinhoud van het systeem, de erosie en de lekdichtheid, werd de reactor in mei 1974 in bedrijf gesteld. Gedurende dit bedrijf werd de intrinsieke veiligheid eenduidig vastgesteld (4). Bij vermogensdichtheden boven een paar kW per liter leidt iedere verhoging van de reactiviteit tot een onmiddellijke verhoging van de temperatuur, die de exces-reactiviteit meteen teniet doet.

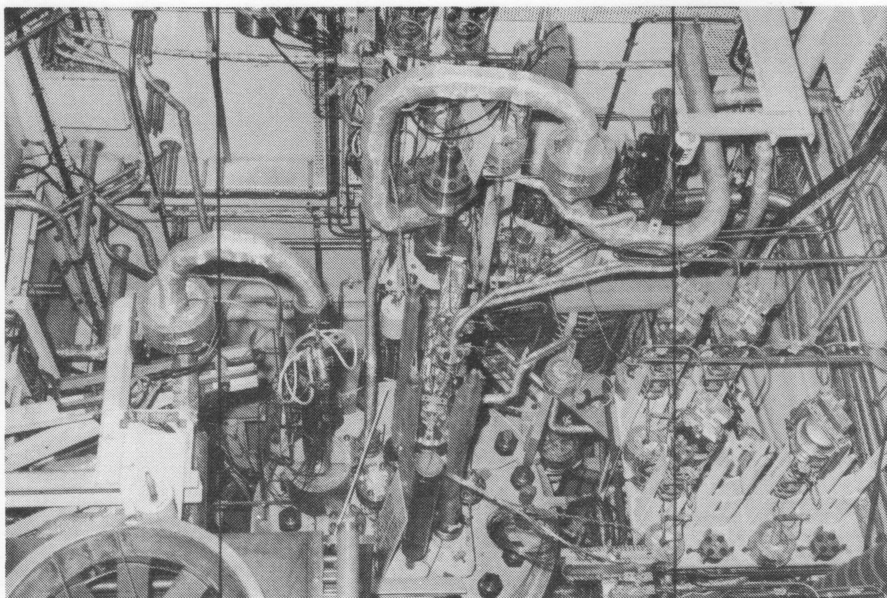
De volgende interessante verschijnselen werden waargenomen. Om te beginnen veranderden – in een langzaam tempo – de eigenschappen van de splijtstof, hetgeen de verdeling van de splijtstof in het reactorvat beïnvloedde. Verder ondergingen de bolletjes stralingsschade, waardoor kleinere deeltjes (brokstukken) ontstonden. Het feitelijke effect bleek echter kleiner dan op grond van eerdere bestralingsexperimenten kon worden verwacht. Dit komt doordat de schade hersteld wordt door de afzetting van brokstukken op de bolletjes. Dit herstel verloopt beter naarmate de temperatuur hoger is. Uit proeven valt af te leiden dat bij 320°C (de ontwerptemperatuur van de vermogensreactor) de stralingsschade en het herstel daarvan door afzetting elkaar ongeveer in evenwicht zullen houden. 'Onderhoud' aan de suspensie kan als volgt plaatsvinden. Door etsen kunnen de brokstukken van de bolletjes, samen met de splijtings- en erosieprodukten worden verwijderd. Deze al of niet continue reiniging vermindert tevens de parasitaire neutronenvangst en verkleint de radioactieve inhoud van de reactor. Volledige opwerking van de splijtstof kan door het oplossen van de gehele bolletjes, gevolgd door een thorex-proces en een sol-gel-proces, waarbij dan de nieuwe bolletjes gemaakt worden.



Figuur 3
Foto van het reactorvat vóór de montage (zie ook figuur 3 in hoofdstuk 24).

De hoeveelheid splijtstof in de reactorkern, nodig om de reactor kritiek te maken, is gering (minder dan 2 kg uranium-235 voor de KSTR). Dit is gunstig als weinig splijtbaar materiaal ter beschikking staat om nieuwe reactoren te starten. De splijtstofinhoud van het buitensysteem (inclusief reinigings- en opwerkingssystemen) bepaalt mede de benodigde hoeveelheid splijtstof. Is de verblijftijd in het buitensysteem kort, dan daalt de conversiefactor, omdat het primair uit thorium gevormde protactinium-233 slechts langzaam tot uranium-233 vervalt (halveringstijd: 27 dagen). Dit protactinium-233 heeft in de reactorkern een redelijk grote kans op neutronenvangst, waardoor het voor de uranium-233 produktie verloren gaat.
Naast de effecten van de splijtstof deed zich het verwachte effect voor van de radiolytische ontleding van water. De produktie van H_2 en O_2 bleek evenredig te zijn met het reactorvermogen en bedroeg 4 kg O_2 per megawattuur. Beide gassen konden gemakkelijk opnieuw tot water gecombineerd worden in het gaszuiveringssysteem. Experimenten in Oak Ridge hebben aannemelijk gemaakt dat geen radiolytisch gas wordt geproduceerd als de suspensietemperatuur hoger is dan 280°C.

In mei 1977 werden de kritische experimenten van de KSTR volgens plan beëindigd. Daarna is de splijtstof uit de reactor verwijderd. Onderzoek van de reactorinstallatie heeft aanvullende gegevens opgeleverd over de splijtstofafzetting in het systeem, de schade door erosie en corrosie en de slijtage van de verschillende componenten (5). Op dit ogenblik wordt de complete demontage voorbereid.



Figuur 4
Foto van het bovenaanzicht van het centrale compartiment van de KSTR.

Referenties

1. J.A.H. Kersten, R. Cenerini, T. Markestein en T. van der Plas, *Reactor Science & Technology A/B 16* (1962), blz. 15.

2. M.E.A. Hermans en H.S.G. Sloten, in: *Peaceful Uses of Atomic Energy (third Geneva-Conference) 11*, U.N. New York (1965), blz. 450.

3. J.J. Went, J.A.H. Kersten, M.E.A. Hermans, H. Wolf. J.J. van Zolingen en H. Wijker, *EURATOM-rapport 1611e*, 1964.

4. *Report on the Aqueous Homogeneous Suspension Reactor Project: second, third & fourth quarter 1974*, KEMA, Arnhem 1975.

5. A. Spruyt en J.A.H. Kersten, *Energiespectrum 4* (1980), blz. 14.

OMREKENINGSFACTOREN

De officiële eenheid van energie is de *joule* (J). Daarnaast worden gebruikt:
erg = de eenheid van energie in het verouderde eenhedenstelsel;
cal = calorie, de energie, nodig voor de verwarming van één gram water met één graad;
kg = de energie, overeenkomend met de massa van een kilogram, numeriek gelijk aan het kwadraat van de lichtsnelheid;
ame = de energie, overeenkomend met de eenheidsmassa van een atoom;
K = kelvin, de energie die overeenkomt met de eenheid van temperatuur, gelijk aan de Boltzmann-constante;

eV = elektronvolt, de energie, overeenkomend met die van een elektron dat is versneld over de eenheid van potentiaalverschil;
Ws = wattseconde;
kWh = kilowattuur;
MW-jaar = megawattjaar;
GW-jaar = gigawattjaar;
tnu = de energie-inhoud van een ton natuurlijk uranium;
tse = de energie-inhoud van een ton steenkool;
toe = de energie-inhoud van een ton aardolie van referentiekwaliteit;
m^3g = de energie-inhoud van een kubieke meter aardgas.

Deze onofficiële eenheden rekent men om in joules door te vermenigvuldigen met:

erg	: $1 . 10^{-7}$
cal.	: 4,184
kg	: $8{,}9876 . 10^{16}$
ame	: $1{,}4924 . 10^{-10}$
K	: $1{,}3807 . 10^{-23}$
eV	: $1{,}6022 . 10^{-19}$
Ws	: 1
kWh	: $3{,}6 . 10^{6}$
MW-jaar	: $3{,}15 . 10^{13}$
GJ	: $1 . 10^{9}$ (gigajoule)
GW-jaar	: $3{,}15 . 10^{16}$
tnu	: $3{,}37 . 10^{16}$ bij conversie
tnu	: $6{,}74 . 10^{14}$ bij lichtwaterreactoren
tse	: $2{,}93 . 10^{10}$
toe	: $4{,}54 . 10^{10}$
m^3g	: $3{,}17 . 10^{7}$ Groningse kwaliteit
m^3g	: $3{,}94 . 10^{7}$ gemiddelde kwaliteit

LIJST VAN SCHEIKUNDIGE ELEMENTEN

element	symbool	atoom-nummer
actinium	*Ac*	89
aluminium	*Al*	13
americium	*Am*	95
antimoon	*Sb*	51
argon	*Ar*	18
arseen	*As*	33
astaat	*At*	85
barium	*Ba*	56
berkelium	*Bk*	97
beryllium	*Be*	4
bismut	*Bi*	83
boor	*B*	5
broom	*Br*	35
cadmium	*Cd*	48
caesium	*Cs*	55
calcium	*Ca*	20
californium	*Cf*	98
cerium	*Ce*	58
chloor	*Cl*	17
chroom	*Cr*	24
curium	*Cm*	96
dysprosium	*Dy*	66
einsteinium	*Es*	99
erbium	*Er*	68
europium	*Eu*	63
fermium	*Fm*	100
fluor	*F*	9
fosfor	*P*	15
francium	*Fr*	87
gadolinium	*Gd*	64
gallium	*Ga*	31
germanium	*Ge*	32
goud	*Au*	79
hafnium	*Hf*	72
hahnium (nielsbohrium)	*Ha*	105
helium	*He*	2
holmium	*Ho*	67
ijzer	*Fe*	26
indium	*In*	49
iridium	*Ir*	77
jodium	*J*	53
kalium	*K*	19
kobalt	*Co*	27
koolstof	*C*	6
koper	*Cu*	29
krypton	*Kr*	36
kurchatovium (rutherfordium *Rd*)	*Ku*	104
kwik	*Hg*	80
lanthaan	*La*	57
lawrencium	*Lr*	103
lithium	*Li*	3
lood	*Pb*	82
lutetium	*Lu*	71
magnesium	*Mg*	12
mangaan	*Mn*	25
mendelevium	*Md*	101
molybdeen	*Mo*	42
natrium	*Na*	11
neodymium	*Nd*	60
neon	*Ne*	10
neptunium	*Np*	93
nikkel	*Ni*	28
niobium	*Nb*	41
nobelium	*No*	102
osmium	*Os*	76
palladium	*Pd*	46
platina	*Pt*	78
plutonium	*Pu*	94
polonium	*Po*	84
praseodymium	*Pr*	59
promethium	*Pm*	61
protactinium	*Pa*	91
radium	*Ra*	88
radon	*Rn*	86
renium	*Re*	75
rhodium	*Rh*	45
rubidium	*Rb*	37
ruthenium	*Ru*	44
samarium	*Sm*	62
scandium	*Sc*	21
seleen	*Se*	34
silicium	*Si*	14
stikstof	*N*	7
strontium	*Sr*	38
tantaal	*Ta*	73
technetium	*Te*	43
telluur	*Te*	52
terbium	*Tb*	65
thallium	*Tl*	81
thorium	*Th*	90
thulium	*Tm*	69
tin	*Sn*	50
titaan	*Ti*	22
unnilhexium	*Unh*	106
uranium	*U*	92
vanadium	*V*	23
waterstof	*H*	1
wolfraam	*W*	74
xenon	*Xe*	54
ytterbium	*Yb*	70
yttrium	*Y*	39
zilver	*Ag*	47
zink	*Zn*	30
zirkonium	*Zr*	40
zuurstof	*O*	8
zwavel	*S*	16

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Actiniden – verzamelnaam voor actinium en alle zwaardere elementen zoals uranium.

Activeringsprodukten – radioactieve stoffen, die vooral ontstaan doordat stabiele kernen getroffen worden door neutronen.

Aerosol – luchtstof, vaste deeltjes die zo klein zijn dat ze geruime tijd in de lucht blijven zweven.

AGR, gasgekoelde reactor – splijtingsreactor met grafiet als remstof en koolzuurgas als koelmiddel.

Alfadeeltje – heliumkern.

Alfastraler – radioactieve kern die alfadeeltjes uitzendt.

Atoom – bouwsteen van de materie die bestaat uit een atoomkern (opgebouwd uit neutronen en protonen) omgeven door elektronen.

Bètadeeltje – snel bewegend elektron.

Bètastraler – radioactieve kern die bètadeeltjes uitzendt.

Biosfeer – het totale complex van planten- en dierenleven.

Bronterm – hoeveelheid radioactief materiaal die bij het smelten van een reactorkern vrijkomt.

Convertor – kernreactor waarin aanzienlijke conversie optreedt.

Conversie – omzetting van bijna-splijtbare atoomkernen in splijtbare atoomkernen, door vangst van neutronen.

Cryogeen – koud, bij lage temperatuur.

Deuterium – zwaar isotoop van waterstof.

Dosis – aan menselijk weefsel afgegeven energie van ioniserende straling.

Drukwaterreactor – lichtwaterreactor, waarin het koelwater wordt verhit zonder te koken; in een stoomgenerator wordt door 'primair' water, water in een 'secundaire' kringloop tot koken gebracht.

Edelgas – gasvormig element dat geen chemische binding kan aangaan.

Effluent – geloosde afvalstof.

Elektron – elementair deeltje met de negatieve eenheidslading.

Excitatie – aanslaan van een atoom of molecule door toevoeging van een bepaalde hoeveelheid energie.

Facility attachment – regels voor inspectie van een kerninstallatie in het kader van het Non-Proliferatieverdrag.

Fall-out – neerslag van radioactieve stoffen gevormd in atmosferische explosies van kernwapens.

Foton – lichtdeeltje, kwantum of eenheidspakketje van energie in elektromagnetische straling.

Galactische straling – straling opgewekt in het melkwegstelsel.

Gammastraling – kortgolvige elektromagnetische straling uitgezonden door atoomkernen.

Grafiet – bepaalde kristalstructuur van koolstof.

Grafietreactor – gasgekoelde reactor met grafiet als remstof.

Halveringstijd – tijd waarin de radioactiviteit van een stof door het natuurlijk verval gehalveerd is.

Hybridische reactor – kernreactor waarin zowel splijting als samensmelting van atoomkernen optreedt.

Ioniserende straling – straling die op haar weg door materie hieraan energie overdraagt door het wegstoten van elektronen uit atomen.

Isotopen – de verschillende atomen van één element waarbij het aantal neutronen in de atoomkern verschilt; de massa verschilt, de chemische eigenschappen zijn gelijk.

Kernfusie – het samensmelten van lichte atoomkernen, waarbij energie vrijkomt.

Kernsplijting – het proces waarbij een zware atoomkern uiteen valt in kleinere kernen; hierbij komt energie vrij en kunnen tevens één of meer neutronen vrijkomen.

Kokendwaterreactor – kernreactor waarin de stoom ter plaatse van de reactorkern wordt gevormd; splijtingsreactor met gewoon water dat aan de reactorkern kookt.

Kweekreactor – een kernreactor waarin meer splijtbaar materiaal wordt gevormd door absorptie van neutronen in niet-splijtbare isotopen, dan door splijting wordt vernietigd.

Lichtwaterreactor – kernreactor die zowel gemodereerd als gekoeld wordt met gewoon water.

LOCA, Loss of Coolant Accident – ongeluk als gevolg van het verloren gaan van koeling van de reactorkern.

Massaspectrometer – instrument waarmee de massa van een atoomkern kan worden vastgesteld, zodat die kern kan worden geïdentificeerd.

Meiose – reductiedeling.

Moderator (remstof) – middel waarmee in een thermische reactor neutronen wordt afgeremd (bijvoorbeeld licht water of zwaar water).

Molecule – chemische binding van een aantal atomen.

Neutron – een elektrisch neutraal deeltje dat meestal een onderdeel is van een atoomkern, doch hieruit ook kan worden vrijgemaakt.

Opwerking – verwijdering van splijtingsprodukten en plutonium uit bestraalde splijtstof.

Plasma – een zeer heet gas dat elektrisch geleidend is; plasma's spelen een rol bij kernfusie en bij de elektriciteitsopwekking met de MHD-methode.

Plutonium – element dat in zeer geringe hoeveelheden in uranium voorkomt; kan ontstaan door absorptie van een neutron in uranium-238.

Proton – elementair deeltje met de positieve eenheidslading.

Rad – afkorting van radiation absorbed dose, een eenheid voor de hoeveelheid geabsorbeerde ioniserende straling.

Rem – afkorting van röntgen equivalent man, eenheid van ioniserende straling die hetzelfde biologisch effect heeft als een rad röntgenstraling.

Remstof – materie waarin snelle neutronen, die bij kernsplijting vrijkomen, worden afgeremd tot thermische neutronen die voor het veroorzaken van een splijting geschikt zijn.

Scenario – schets van mogelijke toekomstige ontwikkelingen.

Solidificatie – na opwerking omzetten in vaste stof.

Splijtingsprodukten – radioactieve stoffen die ontstaan als gevolg van een kernsplijtingsproces.

Splijtstof – uranium of plutonium, meestal in oxydische vorm, met een speciale isotoop-samenstelling.

Terrestrische straling – straling opgewekt in de aarde, in het bijzonder de aardkorst.

Transuranen – elementen met een massa zwaarder dan uranium.

Tributylfosfaat – organisch oplosmiddel gebruikt bij het opwerken van bestraalde splijtstof.

Tritium – zwaar isotoop van waterstof.

Troposfeer – onderste laag van de atmosfeer.

Uranium – element No 92: splijtstof voor kernenergiecentrales; natuurlijk uranium bestaat voor 99,3% uit ^{238}U en voor 0,7% uit ^{235}U.

Zircalloy – legering van het metaal zirconium.

Zwaar water – water waarvan het grootste gedeelte uit deuterium (D_2O) bestaat.

Zwaarwaterreactor – reactor die wordt gemodereerd (en soms ook gekoeld) met zwaar water.

REGISTER

DE AUTEURS

E. ABMA (1924) studeerde sociale geografie aan de Universiteit van Amsterdam. Hij promoveerde in 1962 aan de Rijksuniversiteit van Utrecht. Van 1950 tot 1969 was hij verbonden aan de Afdeling Sociologie en Sociografie van de Landbouwhogeschool te Wageningen. Sinds 1969 is hij als hoogleraar verbonden aan de Rijksuniversiteit van Leiden. Hij is daar belast met de leiding van een onderzoek naar de invloed van particuliere organisaties op de totstandkoming van beleid.

W.L.M. ADRIAANSEN (1937) studeerde economie aan de Nederlandse Economische Hogeschool te Rotterdam. Hij promoveerde in 1978 aan de Erasmus Universiteit. Vanaf 1978 is hij secretaris van de Algemene Energieraad, na een loopbaan bij het ministerie van Economische Zaken in de jaren 1971 tot 1978.

C.D. ANDRIESSE (1939) promoveerde in 1969 aan de Technische Hogeschool te Delft in de technische wetenschappen. Van 1971 tot 1980 werkte hij aan de Rijksuniversiteit te Groningen in de astrofysica. Sedert twee jaar is hij in dienst van de NV KEMA te Arnhem, waar hij zich bezighoudt met onderzoek in de reactorfysica. Op zijn naam staat een groot aantal wetenschappelijke publicaties, waaronder *Fluctuation Theory of the Stellar Mass Loss*, Proceedings of the IAU Colloquium 59 (Trieste 1980).

G.A. DE BOER (1937) is hoofd van de Afdeling Produktontwikkeling van de BV Neratoom. Na zijn studie werktuigbouwkunde aan de Technische Hogeschool te Delft (1962) werkte hij aan de bouw en inbedrijfstelling van een kernreactor in Zwitserland. Hij is sedert 1968 in dienst van Neratoom. Van 1 januari 1982 tot 1 januari 1983 maakt hij deel uit van de staf van de Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid.

M. BOGAARDT (1922) studeerde natuurkunde aan de Rijksuniversiteit te Groningen. In 1953 promoveerde hij te Utrecht. Was als onderzoeker o.m. werkzaam te Kjeller in Noorwegen, Saclay in Frankrijk, aan het Collège de France en de Rijksuniversiteit te Utrecht. Van 1958 tot 1970 was hij gewoon hoogleraar warmtetechniek en reactorbouw aan de Technische Hogeschool te Eindhoven. In 1970 aanvaardde hij de functie van directeur van Ultra-Centrifuge Nederland NV. In datzelfde jaar werd hij te Eindhoven buitengewoon hoogleraar.

C.M. BRAAMS (1925) is vanaf 1959 directeur van het FOM-Instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen' te Nieuwegein. Na beëindiging van zijn studie experimentele natuurkunde in 1952 werkte hij aan het Nuclear Physics Department van het Massachusetts Institute of Technology (USA). In 1955 trad hij in dienst van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM); zijn promotie vond plaats in 1956. Hij was in de jaren 1963-1964 als *visiting scientist* verbonden aan de Boeing Scientific Research Laboratories in Seattle (USA). Naast zijn directeurschap van Rijnhuizen is hij buitengewoon hoogleraar aan de Rijksuniversiteit van Utrecht.

P.J. BRUSSAARD (1929) promoveerde in 1958 aan de Rijksuniversiteit te Leiden op een onderwerp uit de theoretische kernfysica. Zijn loopbaan omvat onderzoeken aan het FOM-instituut Rijnhuizen, het Max Planck-instituut te München, Rice University (Houston, USA) en Duke University (Durham, USA). Sinds 1971 is hij hoogleraar aan de Rijksuniversiteit in Utrecht.

H. VAN DAM (1940) studeerde technische natuurkunde te Delft, waar hij in 1971 de doctorsgraad behaalde. Hij verrichtte reactorfysisch onderzoek aan de Technische Hogeschool en het Interuniversitair Reactor Instituut te Delft, waaraan hij van 1971 tot 1980 als lector en sedert 1980 als hoogleraar verbonden is.

J.A.G. DAVIDS (1928) studeerde biologie aan de Rijksuniversiteit te Leiden, waar hij in 1953 zijn doctoraal behaalde. Hij is als bioloog werkzaam in de Gezondheidsbeschermingsafdeling van het Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten.

B.TH. EENDEBAK (1939) werkt als fysicus bij de NV KEMA te Arnhem. Hij studeerde technische natuurkunde aan de Technische Hogeschool te Delft. Van 1964 tot 1966 was hij als leraar verbonden aan het Koninklijk Instituut voor de Marine te Den Helder. Van 1966 tot 1974 verrichtte hij onderzoek op het gebied van de splijtstofhuishouding, thermo-hydraulica en reactorveiligheid bij de kerncentrales te Dodewaard en Borssele. Sedert 1974 houdt hij zich vooral bezig met de risico-evaluatie van de elektriciteitsvoorziening in Nederland.

Y. VAN DER FEER (1919) studeerde natuurkunde aan de Rijksuniversiteit van Utrecht. Hij promoveerde daar in 1958. Tot 1959 bleef hij verbonden aan de universiteit als wetenschappelijk medewerker. Daarna werd hij hoofd van de afdeling Stralingsbeschermingsdienst van het RCN te Petten. Sedert 1966 is hij hoofd van de afdeling Gezondheidsbescherming van het Energieonderzoek Centrum Nederland.

J.N.C. VAN GEEL (1935) is werkzaam als Hoofd Onderzoek en Ontwikkeling bij Eurochemie te Mol, België. Hij beëindigde in 1960 zijn studie chemische technologie aan de Technische Hogeschool te Delft. Vervolgens studeerde hij enige jaren kernenergie aan de Columbia Universiteit te New York. Tot 1965 deed hij onderzoek op het gebied van de plutoniumchemie. In 1968 volgde zijn promotie. Tot 1974 hield hij zich vooral bezig met de chemische opwerking van splijtstofelementen; sedertdien werkt hij aan onderzoekingen met betrekking tot nucleair afval.

J.A. GOEDKOOP (1921) behaalde zijn doctoraal scheikunde te Amsterdam in 1948 en promoveerde er vier jaar later op een proefschrift over kristallografie. Sinds 1959 is hij wetenschappelijk directeur van het Energieonderzoek Centrum Nederland. Daarvoor was hij gedurende zeven jaar verbonden aan het Noors-Nederlands Joint Establishment for Nuclear Energy Research te Kjeller (Noorwegen). Hij publiceerde o.m. *Kernenergie in de Lage Landen* (Spectrum).

R.J.S. HARRY (1936) is projectleider splijtstofbewaking bij het Energieonderzoek Centrum Nederland in Petten. Tevens is hij voorzitter van de ESARDA-werkgroep technieken en standaarden voor niet-destructieve analyses. Hij is sinds zijn doctoraalexamen experimentele natuurkunde aan de Rijksuniversiteit te Leiden in 1963 werkzaam bij het ECN, waar hij tot 1971 onderzoek verrichtte in de neutronenspectrometrie. Zijn huidige functie behelst mede het geven van adviezen aan overheid en bedrijfsleven en deelname aan diverse internationale adviesgroepen en internationaal overleg.

A. HEERTJE (1934) studeerde economie aan de Universiteit van Amsterdam, waar hij in 1956 doctoraal examen deed en in 1960 promoveerde op een proefschrift over monopolistische en oligopolistische markten. Sinds 1963 is hij hoogleraar economie aan de juridische faculteit van de Universiteit van Amsterdam. Hij

publiceerde een groot aantal boeken en artikelen in binnen- en buitenland, waaronder *Economie en Technische Ontwikkeling* (Leiden 1973).

P.J. VAN DER HULST (1943) is als fysicus werkzaam bij de NV KEMA, waar hij o.a. belast is met de centrale aankoop van uranium en verrijkingsarbeid. Hij studeerde in 1968 af in de technische natuurkunde aan de Technische Hogeschool te Delft. Daarna werkte hij in Dounreay (Schotland) o.a. aan de kernbeladingsprogramma's voor de prototype snelle kweekreactor. Ook was hij werkzaam aan de snelle natriumgekoelde reactor te Kalkar (veiligheidsaspecten en IAEA safeguards). In 1981 publiceerde hij een studie over de mogelijkheden van de snelle kweekreactor: *Role of Breeder Reactor System in the European Community.*

J. KISTEMAKER (1917) promoveerde in 1945 aan de Rijksuniversiteit te Leiden in de natuurkunde. Hij verrichtte onderzoeken aan het Kamerlingh Onnes Laboratorium te Leiden, het Natuurkundig Instituut van Niels Bohr te Kopenhagen (1946) en het Zeeman Laboratorium. In 1955 werd hij benoemd tot directeur van het FOM-Laboratorium voor Massascheiding te Amsterdam en conservator van de Teylers Stichting te Haarlem. Uit hoofde van die laatste functie werd hij bijzonder hoogleraar aan de Rijksuniversiteit te Leiden. In 1960 werd de naam van het FOM-laboratorium veranderd in FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica. In 1977 ontving Kistemaker de Energieprijs van de Stichting Alfried Krupp von Bohlen und Halbach. Hij is eredoctor aan de universiteiten van Luik en Lublin.

P.H. KOOIJMANS (1933) is hoogleraar in het volkenrecht aan de Rijksuniversiteit van Leiden. Hij studeerde rechten en economie aan de Vrije Universiteit te Amsterdam, waar hij in 1964 promoveerde in de rechten. Hij bleef tot 1973 aan deze universiteit werkzaam, eerst als wetenschappelijk medewerker en vanaf 1965 als hoogleraar. Van 1973 tot 1977 was hij staatssecretaris van Buitenlandse Zaken.

J. KUYPERS (1930) is werkzaam bij de NV KEMA als hoofd van de afdeling Technologische Ontwikkeling. Hij deed onderzoek en ontwikkelingswerk ten behoeve van de KEMA suspensie-testreactor en had van 1974 tot 1977 de leiding van het KSTR-bedrijf. In zijn huidige functie is hij belast met de leiding over het technologisch ontwikkelingswerk bij de KEMA op het gebied van rookgaszuivering, alternatieve energie, radioactief afval en stroming. Kuypers studeerde in 1960 af aan de Technische Hogeschool te Delft met als hoofdrichting de chemische technologie.

M. LEVENSON (1923) is als *executive engineer* verbonden aan de Bechtel Power Corporation in San Francisco, USA. Hij studeerde aan de universiteiten van Minnesota en Chicago. Hij was o.m. directeur van de Nuclear Division van het Electric Power Research Institute en het Experimental Breeder Project van het Argonne Laboratory. Tevens was hij voorzitter van het Internal Reactor Safety Review Committee in Argonne.

J.J. VAN LOEF (1924) studeerde natuurkunde en wiskunde aan de Rijksuniversiteit van Utrecht en de Universiteit van Wisconsin (USA). In 1955 promoveerde hij te Utrecht. Hij verrichtte onderzoek in de snelle neutronenfysica aan de universiteiten van Wisconsin en Chili. Van 1960 tot 1964 werkte hij in het Natuurkundig Laboratorium van Philips aan een onderzoek naar de toepassing van nucleaire technieken in vaste stof. In 1964 werd hij wetenschappelijk directeur van het Interuniversitair Reactor Instituut te Delft, welke functie hij bekleedde tot 1980. Sedertdien is hij hoogleraar aan de Technische Hogeschool en het IRI te Delft.

A.J. VAN LOON (1944) is wetenschapsredacteur bij de NV KEMA. Hij studeerde geologie aan de Rijksuniversiteit van Leiden, waar hij in 1972 promoveerde. Na onderzoek op het gebied van afzettingsmilieu en afzettingsmechanismen aan de RU Leiden en de Vrije Universiteit werkte hij als redacteur en uitgever bij Het Spectrum en De Standaard. Hij was lid van de redactieraad van *Sedimentary Geology* en hoofdredacteur van *Geologie en Mijnbouw*. Van Loon is de auteur van een groot aantal wetenschappelijke en populair-wetenschappelijke publicaties.

P. MOSTERT (1928) is bijzonder hoogleraar aan de Rijksuniversiteit van Utrecht en hoofd van de afdeling reactorfysica van de NV KEMA. Na zijn studie technische natuurkunde aan de Technische Hogeschool te Delft werkte hij tot 1961 mee aan de bouw van de hoger-onderwijs-reactor te Delft. Tijdens zijn loopbaan bij de NV KEMA was hij betrokken bij de bouw van de kerncentrales te Dodewaard en Borssele.

F.J. RAHN (1942) studeerde aan Queens College en Columbia University in New York. Hij is thans werkzaam bij de Nuclear Power Division van het Electric Power Research Institute in de Verenigde Staten. Zijn loopbaan omvat o.m. onderzoeken op het gebied van veiligheid en analyse van kernenergie en stralingsanalyse bij het EPRI, aan de Columbia Universiteit en in het bedrijfsleven.

C.E. RASMUSSEN (1939) is werkzaam bij het Interuniversitair Reactor Instituut te Delft als hoofd van de Stralingsbeschermingsdienst. Hij is tevens docent stralingshygiëne en dosimetrie aan het IRI en de Technische Hogeschool te Delft. Hij promoveerde in de experimentele natuurkunde in 1970 aan de Rijksuniversiteit te Leiden. Hij verrichtte o.m. onderzoek op het gebied van de plasmafysica aan het FOM-instituut voor Atoom- en Molecuulfysica te Amsterdam. Publiceerde o.a. samen met J. Weber, *Stralingsbescherming: Inleiding tot de Stralingshygiëne* (Delft 1979[3]).

F.J. SOBELS (1922) studeerde biologie aan de Rijksuniversiteit te Utrecht (1948). Vóór zijn promotie in 1952 werkte hij aan de Universiteit van Zürich; daarna o.m. aan de universiteiten van Edinburgh en California. Van 1965 tot 1974 was hij directeur van het Interuniversitair Instituut voor Radiopathologie en Stralenbescherming. Hij was voorzitter van de International Association of Radiation Research, het United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation en het Raadgevend Comité voor het Beheer van het Programma Biologie-Gezondheidsbescherming van Euratom. Thans is hij hoogleraar in de stralengenetica en chemische mutagenese aan de Rijksuniversiteit te Leiden.

A. TIKTAK (1933), adjunct-directeur van de NV Provinciale Zeeuwse Energie-Maatschappij, studeerde werktuigbouwkunde aan de Technische Hogeschool te Delft. Hij werkte mee aan het ontwerp van de Halden kokendwaterreactor (Noorwegen) tot 1960, aan de bouw en exploitatie van de hoge-fluxreactor te Petten tot 1965, en aan de bouw en exploitatie van de kernenergiecentrales te Dodewaard en Borssele.

R.W. VELLEMA (1950) behaalde in 1973 zijn doctoraal economie aan de Universiteit van Amsterdam. Hij is thans hoofd van de groep economie en statistiek van de technisch-economische afdeling bij de NV KEMA. Publiceerde o.m. in *Intermediair, Economisch Statistische Berichten* en *Financieel Overheidsbeheer*.

B. VERKERK (1921) studeerde analytische scheikunde aan de Universiteit van Amsterdam tot 1955. Sinds 1981 is hij coördinator van het Nucleair Afval Onder-

zoek bij de Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten. Daarvoor werkte hij bij het Natuurkundig Laboratorium van de NV Philips (1948-1958) en was hij achtereenvolgens hoofd van de afdeling chemie (RCN) en coördinator industriële betrekkingen bij het ECN.

W.A. WAGENAAR (1941) is hoofd van de afdeling experimentele psychologie aan het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg. Hij studeerde experimentele psychologie aan de Rijksuniversiteit van Utrecht en promoveerde aan de Rijksuniversiteit van Leiden in 1972. Sinds 1978 is hij tevens docent aan de RU te Leiden.

A.W. VAN WEERS (1939) studeerde biologie aan de Rijksuniversiteit van Leiden tot 1965. Hij is thans werkzaam in de afdeling Gezondheidsbescherming van het Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten. Hij houdt zich in het bijzonder bezig met de milieu-aspecten van de verspreiding van radioactieve stoffen.

S.H. WOLDRINGH (1924) is hoofd van de kernenergiecentrale te Dodewaard. Hij studeerde elektrotechniek aan de Technische Hogeschool te Delft en werkte van 1956 tot 1963 bij het Reactor Centrum Nederland (thans ECN).

Gebruik van kernenergie, met de gevolgen daarvan voor milieu en maatschappij. Ervóór of ertégen?
En hoe kan de beslissing over toepassing beïnvloed worden?
Vragen waarmee bijna iedereen worstelt.

Kernenergie in beweging geeft op deze vragen geen beslissend antwoord, maar in dit boek belichten vierendertig deskundigen de uiteenlopende problematiek van het gebruik van kernenergie. Ieder van hen behandelt op zijn eigen vakterrein de daar voorkomende vraagstukken.
Er wordt niet alleen ingegaan op de eventuele gevolgen voor het milieu, maar óók het gehele technische proces en de invloed die toepassing van kernenergie op de maatschappij kan hebben, wordt behandeld.
Elk dezer aspecten in afzonderlijke hoofdstukken.
Mede door het uitgebreide begrippenregister dat helpt deze gecompliceerde materie toegankelijk te maken, is een voortreffelijk **Handboek bij vraagstukken over kernenergie** ontstaan.

De brede maatschappelijke discussie over kernenergie krijgt door het verschijnen van dit boek een hechter fundament.

ISBN 90 60 8334 14